



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MAX SUNNARBORG

**NESTE OILIN PORVOON ÖLJYNJALOSTAMON VARAVOIMA-
VERKON SELVITYS- JA KEHITYSSUUNNITELMA**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 5. syyskuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

SUNNARBORG, MAX: Neste Oilin Porvoon öljynjalostamon varavoimaverkon selvitys- ja kehityssuunnitelma

Diplomityö, 98 sivua, 27 liitesivua

Marraskuu 2012

Pääaine: Sähköverkot ja -markkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: varavoimaverkko, verkostolaskenta, varavoimageneraattori, sähköverkon komponentit

Prosessiteollisuudessa, jossa käsitellään palavia nesteitä ja kaasuja, jo lyhyillä sähkökatkoilla on suuria haittavaikutuksia tuotantoon. Häiriötilanteita varten Porvoon jalostamolle on rakennettu varavoimaverkko, jolla taataan jalostusprosessien hallittu ja turvallinen alasajo.

Porvoon jalostamon varavoimaverkkoa on rakennettu monella eri vuosikymmenellä ja sen kunnosta ei ollut tarkkaa tietoa, joten Neste Oil halusi teettää diplomityön, jossa selvitetäisiin Porvoon jalostamon varavoimaverkon nykytila. Varavoimaverkon tila selvitettiin suorittamalla sille vika-, laatu- ja tehotasapainotarkastelut NEPLAN nimisellä verkostonlaskentaohjelmistolla.

Työ koostuu kolmesta osasta. Työn ensimmäisessä osiossa tutustutaan varavoimaverkon komponentteihin sekä niiden sijaiskytkentöihin ja kerrotaan eri tutkimusmenetelmistä. Työn toisessa osiossa käsitellään varavoimaverkon laskentatuloksia ja esitetään varavoimaverkosta havaitut puutteet. Työn viimeisessä osiossa kerrotaan parannusehdotukset varavoimaverkosta havaittuihin puutteisiin sekä arvioidaan, miten paljon parannusehdotusten toteuttaminen tulisi maksamaan.

Työssä havaittujen puutteiden ja niihin esitettyjen parannusehdotusten pohjalta Neste Oilissa tehtiin jatkosuunnitelmia varavoimaverkon käyttövarmuuden parantamiseksi. Parannusehdotukset tullaan toteuttamaan seuraavan Porvoon jalostamon suurseisokin aikana vuonna 2015.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

SUNNARBORG, MAX: Neste Oil's Porvoo oil refinery's emergency power system analysis and development proposal

Master of Science Thesis, 98 pages, 27 Appendix pages

November 2012

Major: Power systems and markets

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Standby power system, network computing, standby power generator, power network components

In the process industry, where are dealing with flammable liquids and gases, already short power failures have major side effects in the production. For the event of failures, a standby power system is built at the Porvoo refinery, which ensures controlled and safe shutdown of the refining processes.

Porvoo refinery's emergency power system network is built in many different decades and Neste Oil didn't have accurate information about its condition, therefore Neste Oil wanted to make a master thesis, which would show the current state of the emergency power system network. Emergency power system network status was explored by the fault, quality, and power balance reviews, that were made with network calculation software called NEPLAN.

The work consists of three parts. The first part introduces emergency power system components and their foster connections and describes the different research methods. The second section deals with calculation results of the emergency power system and presents its weaknesses. The last section describes the suggested improvements of the emergency power system network, and assess, how much the improvements shown in the implementation proposals would cost.

Neste Oil's future plans to improve emergency power system network were made on the basis of the weaknesses found in the master thesis and the presented improvements. Suggestions for improvement will be carried out in the next Porvoo refinery shutdown in 2015.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Neste Oil Oyj:n antamasta aiheesta toukokuun 2012 ja marraskuun 2012 välisenä aikana.

Työn tarkastajana on toiminut professori Seppo Valkealahti Tampereen teknillisestä yliopistosta, hänelle kiitokset hyvistä neuvoista.

Ohjaajana on toiminut kehityspäällikkö Risto Juusti Porvoon öljynjalostamolta. Kiitän häntä työhön liittyvästä ohjeista. Lisäksi haluan kiittää kaikkia Neste Oilin ja Neste Jacobsin työntekijöitä hyvistä neuvoista sekä miellyttävästä työympäristöstä.

Erityiskiitokset haluan osoittaa Pauliinalle, Maijalle ja perheelleni, jotka ovat kannustaneet ja tukeneet minua opinnoissani.

Turussa 19.11.2012

Max Sunnarborg

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Työn tausta.....	1
1.2	Työn sisältö ja tavoitteet.....	2
2	Lähtökohdat työn tekemiseen.....	3
2.1	Varavoimaverkkojen tarkastelu	3
2.1.1	Käyttövarmuus.....	3
2.1.2	Katkosaika	4
2.1.3	Tehon mitoittaminen ja kuormien ryhmittely.....	4
2.2	Varavoimaverkon suunnittelussa noudatettavat standardit ja määräykset	5
2.3	Nykyisen varavoimaverkon toteuttamisperusteet	7
3	Varavoimaverkkoon kuuluvat laitteet	8
3.1	Varavoimaverkon rakenne	8
3.2	Dieselmootorigeneraattorit	8
3.2.1	Dieselgeneraattorin rakenne	9
3.2.2	Dieselmoottori	10
3.2.3	Tahtigeneraattori.....	11
3.2.4	Kuormitetun tahtigeneraattorin mallintaminen	12
3.2.5	Dynaaminen UPS-järjestelmä	13
3.3	Muuntajat.....	14
3.3.1	Muuntajan sijaiskytkentä.....	15
3.3.2	Muuntajan oikosulkuimpedanssi	17
3.3.3	Muuntajan jänniteenalenema ja häviöt	17
3.3.4	Kolmivaihemuuntajan kytkennät ja kellolukemat	18
3.4	Suojalaitteet.....	19
3.5	Johdot ja kaapelit.....	20
3.6	Kuormat	22
3.6.1	Kuormien mallintaminen.....	22
3.6.2	Oikosulkumoottorit	23
3.6.3	Valaistus	26
4	Tutkimusmenetelmät.....	27
4.1	NEPLAN-ohjelma sähköverkon mallinnustyökaluna	27
4.2	Sähköverkon tehonjako	27
4.3	Tehonjaon laskenta NEPLAN:lla	28
4.4	Silmukoidun verkon tehonjakolaskenta.....	29
4.4.1	Newton-Raphson -menetelmä	32
4.4.2	Newton-Raphson -menetelmä sähköverkkojen tehonjaossa	34
4.5	Sähköverkon viat.....	36
4.6	Vikavirtojen laskeminen NEPLAN:lla	37
4.7	Symmetristen vikojen analysointi	38
4.8	Symmetriset komponentit	40

4.9	Epäsymmetristen vikojen analysointi.....	42
5	Varavoimaverkon mallinnus ja verkossa havaitut puutteet.....	45
5.1	Varavoimaverkon käyttötapaa	45
5.2	Varavoimaverkon komponenttien mallinnus	48
5.3	Varavoimaverkosta tutkittavat asiat	48
5.4	Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 syöttämät alueet.....	53
5.4.1	Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 tehotasapaino ja jännitteenalenema	57
5.4.2	Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 syöttämien alueiden vikavirtatarkastelu	59
5.5	Generaattorin GE-6106 syöttämä alue.....	59
5.5.1	Generaattori GE-6106 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema	60
5.5.2	Generaattori GE-6106 syöttämän alueen vikatarkastelu	62
5.6	Generaattorin GE-6107 syöttämä alue.....	64
5.6.1	Generaattori GE-6107 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema	64
5.6.2	Generaattori GE-6107 syöttämän alueen vikatarkastelu	66
5.7	Generaattorin GE-6109 syöttämä alue.....	68
5.7.1	Generaattori GE-6109 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema	69
5.7.2	Generaattori GE-6109 syöttämän alueen vikatarkastelu	70
5.8	Voimalaitoksen muuntamon M50 syöttämä alue	72
5.9	Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämät alueet.....	73
5.9.1	Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 tehotasapaino ja jännitteenalenema	74
5.9.2	Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämien alueiden vikavirtatarkastelu	76
5.10	Generaattorin GE-6113 syöttämä alue.....	78
5.10.1	Generaattori GE-6113 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema	79
5.10.2	Generaattori GE-6113 syöttämän alueen vikatarkastelu	80
5.11	Saarekkeissa havaittujen puitteiden yhteenveto	81
5.11.1	Varavoimaverkon tehotasapaino.....	81
5.11.2	Varavoimaverkon jännitteenalenema.....	82
5.11.3	Varavoimaverkon suojaukset.....	83
6	Varavoimaverkon parannusehdotukset	85
6.1	Generaattoreiden kuormitusasteiden parantaminen	85
6.1.1	Generaattorin GE-6107 kuormitusasteen parantaminen	85
6.1.2	Generaattorin GE-6109 kuormitusasteen parantaminen sekä säiliö- ja satama-alueen varavoimasyötön varmistaminen.....	86
6.2	Varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen	87

6.2.1	Generaattorin GE-6106 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen	87
6.2.2	Generaattorin GE-6107 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen	88
6.2.3	Generaattorin GE-6109 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen	89
6.2.4	Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen	89
6.3	Yleisiä parannusehdotuksia Porvoon jalostamon varavoimaverkkoon	89
6.4	Parannusehdotuksista aiheutuvat kustannukset	91
6.4.1	Tehotasapainon parantamisesta aiheutuvat kustannukset	92
6.4.2	Jännitteenalenemien parantamisesta aiheutuvat kustannukset	93
6.4.3	Junapurkausterminalin liittämisestä varavoimaverkkoon aiheutuvat kustannukset	94
7	Johtopäätökset	95
	Liite 1: Muuntamon M106 varavoimaverkon laskentatulokset	
	Liite 2: Jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkon jakelukaavio NEPLAN:lla mallinnettuna	
	Liite 3: Jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkon laskentatulokset	
	Liite 4: Muuntamon M120 varavoimaverkko NEPLAN:lla mallinnettuna	
	Liite 5: Muuntamon M120 varavoimaverkon laskentatulokset	
	Liite 6: Jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkon jakelukaavio parannusehdotuksilla NEPLAN:lla mallinnettuna	
	Liite 7: Jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkon laskentatulokset parannusehdotuksilla	

LYHENTEET JA MERKINNÄT

E	Lähdejännite
f	Taajuus
i_s	Sysäysoikosulkuvirta
I	Virta
\mathbf{I}	Virtamatriisi
I_o	Tyhjäkäyntivirta
I_1	Muuntajan ensiövirta tai staattorivirta
I_2	Muuntajan toisiovirta tai roottorivirta
I_e	Solmupistettä syöttävän elementin virta
I_{Fe}	Muuntajan resistiivinen tyhjäkäyntivirta
I_k''	Alkutilan oikosulkuvirta
I_k'	Muutostilan oikosulkuvirta
I_k	Oikosulkuvirta
I_m	Muuntajan magnetointivirta
\mathbf{J}^0	Jacobin matriisi
n	Pyörimisnopeus tai yhtälöryhmän dimensio
N	Kierrosluku
n_s	Tahtinopeus
p	Napapariluku
P	Pätöteho
P_f	Rautahäviöt
P_k	Muuntajan kuormitushäviöt
P_{kn}	Muuntajan nimelliskuormitushäviöt
P_L	Akseliteho
P_m	Mekaaninen teho
P_v	Tuuletus- ja kitkahäviöt
P_s	Sähköteho
P_o	Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt
Q	Loisteho
R	Resistanssi
R_1	Ensiökäämin tai staattorin resistanssi
R_2	Toisiokäämin tai roottorin resistanssi
R_a	Generaattorin johdinresistanssi
R_{fe}	Muuntajan poikittaishaaran resistanssi
R_k	Muuntajan kuormitusresistanssi
s	Jättämä
S	Teho
S_n	Nimellisteho
S_k''	Alkutilan oikosulkuteho

S_k	Oikosulkuteho
t	aika
u	Jännite
u_k	Muuntajan suhteellinen impedanssi
U	Jännite
\mathbf{U}	Jännitematriisi
U^0	Vikapaikan jännite
U_ϕ	Vuojännite
$U_{\phi 1}$	Staattorin vuojännite
$U_{\phi 2}$	Roottorin vuojännite
U_1	Muuntajan ensiöpääjännite
U_2	Muuntajan toisiopääjännite
U_{1v}	Muuntajan ensiövaihejännite
U_2	Muuntajan toisiovaihejännite
U_{hv}	Muuntajan jännitehäviö
U_n	Nimellisjännite
U_v	Generaattorin napajännite
V	Jännite
X	Reaktanssi
$X_{\sigma 1}$	Staattorin hajareaktanssi
$X_{\sigma 2}$	Roottorin hajareaktanssi
X_1	Ensiökäämin reaktanssi
X_2	Toisiökäämin reaktanssi
X_d''	Tahtikoneen pitkittäinen alkureaktanssi
X_d'	Tahtikoneen pitkittäinen muutosreaktanssi
X_d	Tahtikoneen pitkittäinen tahtireaktanssi
X_k	Muuntajan kuormitusreaktanssi
X_m	Magnetointireaktanssi
X_s	Tahtireaktanssi
Y	Admittanssi
\mathbf{Y}	Solmupisteadmittanssimatriisi
z_k	Muuntajan suhteellinen impedanssi
Z	Impedanssi
\mathbf{Z}	Impedanssimatriisi
Z_0	Tyhjäkäynti-impedanssi
Z_f	Vikapaikan vikaimpedanssi
Z_k	Oikosulkuimpedanssi
Z_n	Nimellisimpedanssi
Z_t	Tahtigeneraattorin kokonaisimpedanssi
Z_{th}	Theveninin impedanssi

α	Vaihe-ero
δ	Jännitteen kulma
ε	Tarkkuuskerroin
θ	Vaihekulma
φ	Jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma
ϕ	Magneettivuo
ϕ_h	Magneettipiirin päävuo
AC	Vaihtovirta (engl. alternating current)
ANSI	Yhdysvaltain kansallinen standardi-instituutti (engl. American National Standards Institute)
CENELEC	Eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö (engl. European Committee for Electrotechnical Standardization)
DRUPS	Dieselveimalla pyörivä UPS (engl. Diesel Rotary UPS)
FACTS	Joustavat vaihtosähkön siirtojärjestelmät (engl. Flexible AC Transmission Systems)
IEC	Sähköalan kansainvälinen standardisoimisjärjestö (engl. International technical Commission)
ISO	Kansainvälinen standardisoimisjärjestö (engl. International Organization for Standardization)
ITU	Kansainvälinen telekommunikointijärjestö (engl. International Telecommunication Union)
Mt	Megatavu
SESKO	Sähkö- ja elektroniikka-alan kansallinen standardointijärjestö
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
TN-S	TN-S järjestelmässä on erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin koko järjestelmässä
UPS	Keskeytymätön tehon syöttö (engl. Uninterruptible Power Supply)

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Nyky-yhteiskunnassa sähkön laadun merkitys on kasvanut jatkuvasti ja sähköjärjestelmän romahtaminen aiheuttaisikin satojen miljoonien eurojen vahingot nykyisessä tietoyhteiskunnassa. Erityisesti prosessiteollisuudessa, jossa käsitellään herkästi syttyviä aineita, sähkön laadulla on suuri merkitys. Jännitekatkokset ja poikkeamat sähkön toimituksessa voivat aiheuttaa sekä henkilö- että taloudellisia vahinkoja.

Tampereen ja Lappeenrannan teknilliset yliopistot tekivät vuonna 2009 yhdessä tutkimuksen, jossa selvitettiin siirtoverkon keskeytysten aiheuttamaa haittaa eri teollisuuden aloilla. Selvityksessä ilmeni, että kemianteollisuudessa jo lyhyillä katkoilla on huomattavia haittakustannuksia. Vuodenajasta ja olosuhteista riippuen, muutaman minuutin katkosta aiheutuu noin kahdeksan tunnin tuotantotappiot ja tunnin katkosta arvioitiin seuraavan minimissään 12 tunnin tuotantotappiot. Tulokset kuvaavat yleisesti kemianteollisuutta, mutta niistä saa käsityksen, miten suuri merkitys sähkön laadulla on öljynjalostamolla. (Mäkinen et al. 2009.)

Edellä mainittujen haittojen sekä laitoksen turvallisen toiminnan takaamiseksi Porvoon jalostamolle on rakennettu varavoimaverkko. Sen avulla jalostusprosessit pyritään keskeyttämään ja lopettamaan turvallisesti vakavan sähköntoimitushäiriön aikana.

Viimeisin laaja sähköverkon käyttökeskeytys Suomessa tapahtui vuonna 1975, silloin lähes koko valtakunta oli ilman sähköä 400 kV:n sähköasemalla tapahtuneen katkaisijaräjähdyksen seurauksena. Hieman tämän jälkeen, vuonna 1978, Porvoon jalostamolle rakennettiin varavoimaverkko.

Varavoimaverkon generaattoreita koestetaan kuukausittain, mutta jalostamon alueella ei ole ollut pitkäkestoista sähkökatkosta, jolloin olisi nähty, miten varavoimaverkko käytännössä suoriutuisi tehtävästään. Porvoon jalostamo on laajentunut huomattavasti vuosikymmenten saatossa ja samalla varavoimaverkkoon on kytketty uusia generaattoreita sekä kuormia. Nykyisellään varavoimaverkko sisältää noin 40 muuntamoaa ja 9 generaattoria. Varavoimaverkon tilasta ei ollut tarkkaa tietoa ja Neste Oilissa heräsi ajatus diplomityön teettämisestä, jossa selvitettäisiin varavoimaverkon ajantasaisuus.

Neste Oil Oyj on korkealaatuisiin liikenteen polttoaineisiin keskittyvä jalostus- ja markkinointiyhtiö, joka valmistaa kaikkia tärkeimpiä öljytuotteita. Toimintaa yhtiöllä on maailmanlaajuisesti noin kymmenessä eri maassa. Porvoon jalostamon tuotanto on noin 12,5 miljoonaa tonnia vuodessa ja Neste Oilin liikevaihto vuonna 2011 oli 15,4 miljardia euroa, samana vuonna sen palveluksessa työskenteli noin 5000 henkilöä. (Neste Oil 2012.)

1.2 Työn sisältö ja tavoitteet

Neste Oil Oyj tilasi Neste Jacobs Oy:ltä Porvoon jalostamon varavoimaverkon selvityksen ja kehityssuunnitelman, joka on tarkoitus suorittaa tässä diplomityössä. Diplomityö koostuu kolmesta eri osiosta.

Työn teoriaosuudessa tutustutaan verkon komponentteihin niiden sijaiskytkentöjen avulla ja selvitetään, miten verkon komponentit vaikuttavat varavoimaverkon toimintaan. Varavoimaverkkoa ja siihen liittyviä laitteita tarkastellaan myös kirjallisuuden ja säädösten pohjalta. Tämän jälkeen selvitetään NEPLAN -verkostolaskentaohjelmiston eri laskentamenetelmiä tehonjaon ja vikavirtojen laskennassa.

Työn toisessa osiossa selvitetään varavoimaverkon nykyinen tila suorittamalla verkolle tehotasapaino-, vika- sekä laatutarkastelut ja selvitetään, miten nykyistä varavoimaverkkoa voitaisiin parantaa mallinnuksesta saatujen tulosten pohjalta. Erityistä huomiota kiinnitetään jännitteen alenemaan sekä suojauksien- ja tehotasapainon toteutumiseen.

Diplomityön viimeisessä osiossa parannusehdotukset mallinnetaan verkostolaskentaohjelmistolla ja mallinnuksesta saatujen tulosten pohjalta pohditaan ehdotusten onnistumista teknistaloudellisessa mielessä. Tulevaisuudessa suoritettavia projekteja varten diplomityö antaa ohjeita varavoimaverkon pitkäjänteiselle käytölle.

Diplomityön tarkoituksena on tuottaa Neste Oilille hyödyllistä tietoa Porvoon jalostamon varavoimaverkon tilasta ja samalla saada käyttökokemusta Neste Jacobsille uudesta verkostolaskentaohjelmistosta.

2 LÄHTÖKOHDAT TYÖN TEKEMISEEN

2.1 Varavoimaverkkojen tarkastelu

Nykyään laajat sähkökatkot ovat harvinaisia mutta niihin pitää kuitenkin varautua. Sähkökatkos voi tapahtua milloin tahansa ja varavoimaverkon pitääkin olla jatkuvasti valmiina mahdollisia lyhyitä tai pitkiä häiriöitä varten. Varavoimaverkon pitää kyetä havaitsemaan katkokset automaattisesti ja syöttämään kuormia muutamien sekuntien kuluttua katkon havaitsemisesta.

Varavoimaverkkoja tarkasteltaessa ja suunniteltaessa huomiota pitää kiinnittää varavoimaverkon käyttövarmuuteen, katkosaikoihin, tarvittavan tehon mitoittamiseen ja kuormien ryhmittelyyn sekä moniin muihin asioihin, jotta varavoimaverkosta tulisi mahdollisimman luotettava. (ST-käsikirja 31 2000, s. 23.)

2.1.1 Käyttövarmuus

Käyttövarmuus dieselvarmennetuissa varavoimaverkoissa ilmenee kuorman kannalta siinä, onko laadultaan sopivaa sähköä jatkuvasti saatavissa. Käyttövarmuuteen vaikuttavat monet asiat ja dieselgeneraattorit ovat vain yksi osa kokonaisuutta. Käyttövarmuutta voidaan parantaa esimerkiksi huoltotöillä ja verkon suunnitelmallisella käytöllä. (ST-käsikirja 31 2000, s. 25.)

Varavoimaverkko dieselgeneraattoreineen on iso investointi ja siksi kannattaakin miettiä, miten suuri hyöty varavoimalla saavutetaan. ST-käsikirja 31, varavoimalaitokset kirjassa kuormitukset on jaettu kolmeen eri luokkaa sen mukaan, miten paljon vahinkoa aiheutuu, jos toiminta keskeytyy sähköhäiriöön. Vahingot voivat aiheuttaa kohtuullisen, suuren, tai erittäin suuren vahingon verrattuna investointiin. Vahingot voivat olla taloudellisia tai ne voivat liittyä henkilöturvallisuuteen.

Taulukko 2.1. Sähköhäiriön aiheuttamat vahingot suhteessa varavoiman investointeihin (ST-käsikirja 31 2000, s. 25).

Kuormitusluokka	Sähköhäiriöstä aiheutuvan vahingon laajuus
Luokka 1	Aiheuttaa erittäin suuren vahingon verrattuna investointiin
Luokka 2	Aiheuttaa suuren vahingon verrattuna investointiin
Luokka 3	Aiheuttaa kohtuullisen vahingon verrattuna investointiin

Porvoon jalostamolla sähköhäiriö aiheuttaisi varmasti tuotannollisia ja siten taloudellisia vahinkoja sekä mahdollisesti henkilövahinkoja. Tästä syystä voidaan perustellusti sanoa, että Porvoon jalostamon varavoimaverkkoon liitetyt kuormat kuuluvat tau-

lukossa luokkaan yksi, eli toiminnan keskeytys aiheuttaisi erittäin suuren vahingon verrattuna investointiin.

2.1.2 Katkosaika

Varavoimalaitoksilla varmistetaan yleensä sellaiset kuormat, jotka sallivat muutamien sekuntien katkot. Dieselgeneraattorit saavuttavat nimellisen pyörimisnopeuden muutamassa sekunnissa ja tästä aiheutuu pieni katkos sähkönsyötössä, kun siirrytään tavanomaisesta sähkönsyötöstä varavoimaan. Dieselgeneraattoreihin voidaan yhdistää dynaaminen UPS, jolla voidaan tuottaa sähköä se aika, jonka dieselgeneraattori tarvitsee käynnistykseen. Tällöin varavoimaverkkoon voidaan yhdistää myös kuormia, jotka vaativat katkotonta sähkönsyöttöä. Dynaamisesta UPS:sta kerrotaan tarkemmin luvussa 3.2.5. (ST-käsikirja 31 2000, s. 26.)

Sähkösyötön siirtyessä verkosta varavoimaan tai varavoimasta verkkoon, esiintyy noin 0,2 s katkos käytettäessä niin sanottua katkollista syötönvaihtoa. Varavoimajännitteen ja verkon jännitteen välillä voi olla vaihe-eroa ja siitä saattaa aiheutua virtasysäys. Se voidaan poistaa jatkamalla katkosaikaa esimerkiksi yhden sekunnin pituiseksi. Katkosaika on otettava huomioon verkon komponenteissa. Katkokset paluukytkennässä voidaan poistaa lisäämällä varavoimalaitokseen laitteet tahdistusta ja rinnankäyntiä varten. Käytettäessä varavoimageneraattoreita rinnan jakeluverkon kanssa, jakeluverkon haltijalta on kuitenkin tarkistettava vaatimukset rinnankäytölle tapauskohtaisesti. (ST-käsikirja 31 2000, s. 26.)

Kuormille, jotka vaativat keskeytyksettömän sähkönsyötön, voidaan kytkeä myös akut takaamaan katkeamaton sähkönsyöttö. UPS varmennetuissa kuormissa syöttävän verkon vaihtojännite tasasuunnataan akuille sopivaksi ja akuilta lähtevä tasajännite puolestaan vaihtosuunnataan takaisin kuormille sopivaan muotoon. Syöttävän verkon viikaantuessa, akut syöttävät kuormia. Tällöin puhutaan UPS varmennetuista kuormista. Porvoon jalostamolla UPS varmennettuja kuormia ovat esimerkiksi monet automaatiolaitteet sekä prosessitietokoneet. Jos akkuja ei ole kytketty varavoimaverkkoon, pitää pidempiaikaisissa häiriöissä huomioda akkujen kapasiteetin riittävyys. (ST-käsikirja 31 2000.)

2.1.3 Tehon mitoittaminen ja kuormien ryhmittely

Yleensä varavoimalaitosta ei voida mitoittaa taloudellisista syistä niin suureksi, että sen teho riittäisi kaikkien kuormien syöttämiseen. Tällöin kuormat jakaantuvat kahteen eri ryhmään, dieselvarmistettuihin sekä dieselvarmistamattomiin. Edellä mainitun jaon lisäksi on usein vielä tarpeellista ryhmitellä dieselvarmistetut kuormat sallitun katkosajan sekä kuorman tärkeyden mukaan. Katkosaikaan pitää kiinnittää erityisesti huomiota silloin, jos varavoimaverkkoon on kytketty paljon isoja moottoreita, jolloin niiden käynnistykset pitää porrastaa niiden ottaman suuren käynnistysvirran takia. (ST-käsikirja 31 2000, s. 27.)

Kuormien ryhmitys katkosajan ja tärkeyden mukaan pitää ottaa huomioon myös varavoimaverkoissa, joihin on liitetty useita rinnankäyviä generaattoreita. Tärkeintä kuormaryhmää aletaan syöttää heti, kun ensimmäinen generaattori on kytkeytynyt varavoimaverkkoon ja seuraavat kuormat kytkeytyvät sitä mukaan, kun lisää generaattoreita saadaan tahdistettua verkkoon. Jos johonkin generaattoriin tulee vika, tällöin vähiten tärkeimmät kuormat irrotetaan verkosta, etteivät jäljelle jääneet generaattorit ylikuormittuisi. (ST-käsikirja 31 2000, s. 27.)

2.2 Varavoimaverkon suunnittelussa noudatettavat standardit ja määräykset

Sähköjärjestelmien pitää olla turvallisia käyttäjilleen ja laitteiden tulee olla yhteensopivia siten, etteivät ne aiheuta vaaraa keskenään. Edellä mainittujen asioiden lisäksi standardisoinnilla varmistetaan sähköalan ammattilaisten yhteinen ymmärrys sähköjärjestelmien turvallisesta rakenteesta. Standardisoinnilla myös suojellaan kuluttajaa ja ympäristöä sekä helpotetaan kotimaista ja kansainvälistä kauppaa. Viralliset standardit, kuten SFS-, EN-, ISO- ja IEC-standardit ovat tällaisia asiakirjoja. (SFS ry 2012; Lakervi&Partanen 2008.)

Sähkö- ja elektroniikka-alan standardit pohjautuvat sähköalan kansainvälinen standardointiorganisaation IEC:n standardeihin. Televiestinnän kansainvälistä standardointia hoitaa ITU ja muiden alojen ISO. Eurooppalainen sähköalan standardisointijärjestö CENELEC laatii niin sanotut EN-standardit. Ne perustuvat suurelta osin IEC:n standardeihin. Suomessa sähkö- ja elektroniikka-alan standardisointia hoitaa SESKO ry. SESKO:n valmistelemat standardit julkaisee Suomen Standardisointiliitto SFS ry. Suurin osa Suomessa julkaistavista standardeista vahvistetaan antamalla EN-standardille tunnus SFS-EN. Pieni osa standardeista julkaistaan myös suomenkielisinä. (Lakervi&Partanen 2008.)

Standardit julkaistaan asiakirjoina, joita kuka tahansa voi hankkia ja käyttää. Ne ovat luonteeltaan suosituksia, mutta viranomaiset ja tilaajat voivat edellyttää niiden käyttöä. Standardien tunnus koostuu kirjainyhdistelmästä sekä numerosta. Standardin edessä oleva kirjaintunnus kertoo missä standardi on vahvistettu. SFS-alkuiset standardit ovat vahvistettu Suomessa, EN-alkuiset Euroopassa ja ISO- sekä IEC-alkuiset standardit ovat kansainvälisesti vahvistettuja. (SFS ry 2012.)

Tuotteissa oleva CE-merkintä puolestaan kertoo, että tuotteet on valmistettu voimassa olevien direktiivien mukaisesti. CE-merkintä ei ole vapaaehtoinen, jos tuotetta koskevat direktiivit niin vaativat, esimerkiksi kaikista sähkölaitteista pitää löytyä CE-merkintä. (SFS ry 2012.)

Neste Oilin tuotantolaitoksissa noudatetaan yhtiön sisäisiä spesifikaatioita sekä voimassa olevia standardeja, ohjeita ja määräyksiä. Neste Oilissa on kehitetty omat spesifikaatiot tärkeimmille laitekokonaisuuksille, kuten prosessiuuneille, putkistoille ja sähköistykselle. Neste Oilin spesifikaatioissa määritellään toimintaohjeet laitekokonaisuuksien suunnittelulle ja käytölle.

Alle 1000 V varavoimalaitoksissa, jotka on toteutettu dieselgeneraattoriyhdistelmällä, sovelletaan yhtiön sisäistä sähköistyksen yleisspesifikaatiota N-136: varavoima dieselgeneraattorilaitteisto. Spesifikaatiossa N-136 on määriteltä, mitä standardeja ja ohjeita tulisi noudattaa dieselgeneraattorilaitteiston suunnittelussa ja asennuksessa, jotta dieselgeneraattorilaitteistosta tulisi halutun mukainen. Viranomaisten antamien lakien ja määräyksien, SFS-standardien ja EY-direktiivien lisäksi noudatettavia standardeja ja määräyksiä on esitetty taulukossa 2.2.

Taulukko 2.2. Varavoimalaitoksen suunnittelussa ja asennuksessa sovelletut standardit ja määräykset.

Standardin tunnus	Standardin otsikko
SFS 6000	Pienjännitesähköasennukset
SFS 6002	Sähkötyöturvallisuus
SFS-EN 60529	Sähkölaitteiden kotelointiluokat
SFS-EN 60201-1	Safety of machinery. Electrical equipment of machines
ISO 3046/I-VI	Resiprocating internal combustion engines performance
IEC 60034-sarja	(1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10) Rotating electrical machines
IEC 60085	Recommendations for the classification of materials for the insulation of electrical machinery and apparatus in relation to their thermal stability in service
IEC 60146	Semiconductor converters
IEC 60654	Operation conditions for industrial process measurement and control equipment
IEC 60044-1	Current transformers
IEC 60044-2	Inductive voltage transformers
ST-käsikirja 31	Varavoimalaitokset

Edellä mainittujen standardien ja määräyksien lisäksi ST-käsikirja 31 mainitsee hyviksi suunnittelun apuvälineiksi seuraavat julkaisut ja tahot:

- ISO 8525 sarjan julkaisut, pääasiassa osat 1, 5 ja 12
- Prosessiteollisuuden PSK-sarjan ohjeet
- komponenttivalmistajien käyttöohjeet
- Senerin julkaisu, Suositus pienvoimalaitosten sähköjakeluverkkoon liittämisestä, 1990
- paikalliset viranomaiset (rakentaminen, ympäristö, pelastustoimi)
- vakuutusyhtiöiden vaatimukset
- laitosten valmistajat

Listassa esiintyvien standardien lisäksi on olemassa paljon muita huomioon otettavia julkaisuja, joita tulisi noudattaa varavoimajärjestelmän suunnittelussa. Eri käyttökohteisiin tulevissa varavoimajärjestelmissä on olemassa omia säädöksiä. Jokainen varavoimajärjestelmä pitääkin suunnitella omana projektinaan.

2.3 Nykyisen varavoimaverkon toteuttamisperusteet

Neste Oil Oyj:n Porvoon jalostamon varavoimaverkko on peräisin 70-luvun lopulta. Tämän jälkeen jalostamo on laajentunut huomattavasti. Pelkästään 2000-luvulla jalostamolle on rakennettu ja käynnistetty kolme uutta prosessiyksikköä: dieseliä tuottava tuotantolinja 4 ja uusiutuvaa dieseliä tuottavat NExBTL-yksiköt 1 ja 2. Laajennuksien suunnittelussa ja toteutuksessa varavoimaverkko on jäänyt hieman sivuosaan. Jalostamon laajennuksien yhteydessä on mietitty, mitä kuormia varavoimaverkkoon pitäisi kytkeä poikkeustilanteiden varalle, mutta varavoimaverkon käyttöä ei ole mietitty kokonaisuuden kannalta. (Neste Oil 2012.)

Suunnittelun apuna jalostamon laajennuksissa käytetään yhtiön sisäisiä spesifikaatioita sekä viranomaisten asettamia ohjeita ja määräyksiä. 70-luvulla, kun varavoimaverkkoa alettiin rakentaa, standardit, määräykset ja ohjeistukset eivät olleet niin tarkkoja mitä ne ovat nykyään 2000-luvulla. Uusimmissa Porvoon jalostamon varavoimaverkon laajennuksissa on pyritty noudattamaan ajanmukaisia ohjeita, mutta verkon vanhemmissa osissa on kuitenkin huomattavasti kevyempi suojaustaso ja stabiilisuus, mitä ajanmukaisten ohjeiden mukaan niiden pitäisi olla.

Porvoon jalostamolla varavoima tuotetaan dieselgeneraattoreilla, mitkä syöttävät tehoa 0,4 kV:n sähköverkkoon, joka toimii jalostamolla jakeluverkkona. Siirtoverkkona jalostamolla käytetään 10 kV:n jännitetasoa. Muuntamoiden välinen tehonsyöttö toteutetaankin pääosin 10 kV:n jännitetasossa. Jännite nostetaan muuntajilla 10 kV:iin, kun tehoa halutaan siirtää varavoimaverkossa muuntamolta toiselle, varsinkin jos muuntamoiden välinen etäisyys on pitkä.

Nykyisten ohjeiden mukaan varavoimaverkoissa tulisi pyrkiä suojausten selektiivisyyteen sekä henkilöiden ja materiaalien suojaamiseen. Jalostamon varavoimaverkossa olevat generaattorit ja muuntajat on suojattu ylivirtasuojilla, ja maasulkusuojaus varavoimaverkossa on toteutettu suuntaamattomilla maasulkusuojilla. Nykyisellään varavoimaverkko ei kuitenkaan ole selektiivinen vian tapahtuessa, eikä muuntamoilla jokaisen lähdön alussa ole välttämättä minkäänlaista suojausta.

10 kV:n jännitetason johdotukset muuntamoiden välillä kulkevat pääsääntöisesti maan alla. Kaapeleiden kunto tarkistetaan suurimpien huoltotöiden yhteydessä. Jalostamolla tärkeiden kaapeleiden reitit on pyritty toteuttamaan siten, etteivät ne tuhoutuisi tulipaloissa. Kaapelit kulkevat maan alla hiekalla täytetyissä betonikouruissa. Hiekalla pyritään estämään kaasutaskujen syntyminen johtokouruihin. 0,4 kV:n jännitetason johdotukset kulkevat sekä maan alla että kaapelihyllyillä.

Varavoimaverkon kuormat koostuvat pääosin valaistuksesta sekä tärkeistä moottoreista. Jalostamolla on pyritty liittämään kolmannes alueen valaistuksesta varavoimaverkkoon, mutta varavoimaverkossa olevien lampputen tarkkaa lukumäärää ei kuitenkaan osata sanoa. Jalostusprosessien kannalta tärkeiden pumppujen, tuulettimien ja sekoittimien käynti on pyritty takaamaan varavoimageneraattoreilla. Alueella olevat palovesipumput on kuitenkin varmennettu omilla dieselmoottoreilla, eikä niiden toiminta ole riippuvaista varavoimaverkon toiminnasta.

3 VARAVOIMAVERKKOON KUULUVAT LAITTEET

3.1 Varavoimaverkon rakenne

Varavoimaverkkoja suunniteltaessa yksinkertaisuus ja selkeys on asetettava tavoitteiksi, sillä ne jo sinänsä tuovat paremman käyttövarmuuden, kun teknisyyt ja käyttövirheet vähenevät. Dieselvarmistetut kuormat pyritään ryhmittelemään eri johtojen perään kuin dieselvarmistamattomat kuormat. Lisävarmistusta saadaan, jos varmistetut ja varmistamattomat johdot kulkevat vielä eri reittejä. (ST-käsikirja 31 2000, s. 28.)

Varavoimaverkon sisäisten häiriöiden vaikutusten rajoittamiseksi verkko kannattaa jakaa riittävän pieniin osiin, jotka ovat kukin oman ylivirta- ja oikosulkusuojan perässä. Peräkkäisten suojien selektiivisyys on varmistettava ja suojausportaiden lukumäärä tulisi pitää mahdollisimman pienenä selektiivisyyden mahdollistamiseksi. Jos varavoimaverkkoa syöttää useampi generaattori, pitäisi selektiivisyyden silti toteutua, vaikka vain yksi generaattori olisi toiminnassa. Laajoissa verkoissa täyden selektiivisyyden saavuttaminen on erittäin hankalaa, tämä tulee ottaa huomioon käyttövarmuutta ja suojauksia suunniteltaessa. (ST-käsikirja 31 2000, s. 28.)

Käyttövarmuuden lisäämiseksi kannattaa huomioida myös esimerkiksi huoltonäkökohdat, varavoimahuoneen sijoitus, palotekniset asiat sekä ohjauspiirien käyttöjännitteet. Syötöt varavoimalaitoksen apujärjestelmille pitää ottaa dieselvarmistetusta sähköstä. (ST-käsikirja 31 2000, s. 29.)

Varavoimaverkko koostuu dieselmootorigeneraattoreista, muuntajista, suojalaitteista, johdoista ja kaapeleista sekä erilaisista kuormista. Seuraavissa luvuissa on esitetty edellä mainittujen verkon komponenttien sijaiskytkennät sekä niiden vaikutus verkon toimintaan.

3.2 Dieselmootorigeneraattorit

Dieselmootorigeneraattorit ovat varavoimaverkon teholähteitä. Niiden nimellistehot vaihtelevat alle yhdestä kVA:sta useaan tuhanteen kVA:iin ja ne saavuttavat nimellisen pyörimisnopeutensa noin 8-15 sekunnin sisällä käynnistyksestä. Generaattorin koko ja nimellisyörimisnopeus vaihtelevat nimellistehon mukaan. Dieselgeneraattoreita käytetään useimmiten teollisuudessa varavoiman teholähteinä, mutta niillä voidaan myös tasoittaa piikkejä kulutuksessa tai käyttää pääsääntöisenä teholähteenä, jos esimerkiksi jakeluverkkoon liittyminen on hankalaa. (IEEE Std. 446-1995 2000.)

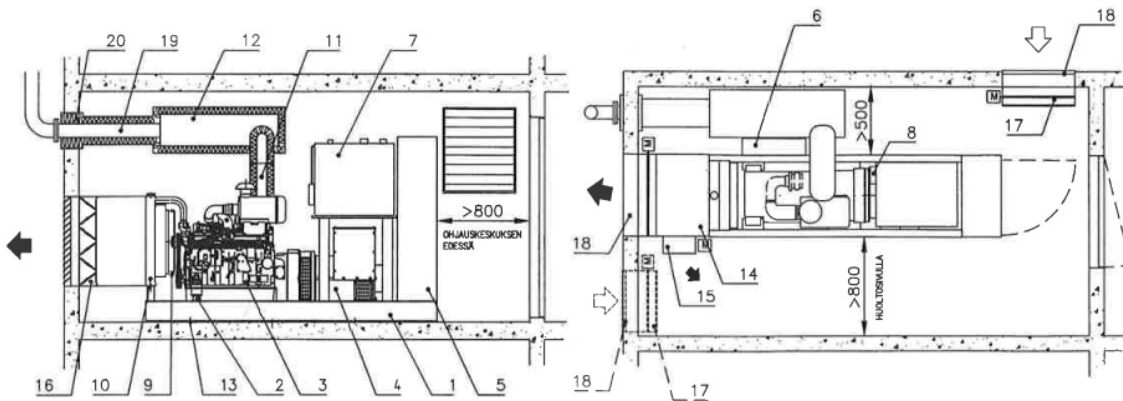
Varavoimaverkon tarvitsema teho saadaan yhdestä tai useammasta dieselgeneraattorista. Generaattoreiden määrän lisäämisellä kasvatetaan varavoimaverkon stabiilisuutta. Maantieteellisesti generaattorit voivat sijaita hyvinkin kaukana toisistaan. Varavoimaverkoissa, joissa toimii useampi generaattori samanaikaisesti, tulisi huomioida pätö- ja loistehon riittävän tasainen jakaantuminen generaattoreiden kesken sekä jatkuvuustilanteissa että hitaissa ja äkillisissä kuormituksen muutoksissa. Ongelmien välttämiseksi rinnankäyvien generaattoreiden tulisikin olla keskenään identtisiä. Jos generaattorit suunnitellaan käymään rinnan jakeluverkon kanssa, pitää tahdistukseen kiinnittää erityistä huomiota. Verkon suuren oikosulkutehon vuoksi, väärä tahdistus verkkoon aiheuttaa suuria oikosulkuvirtoja kytkentäkohdassa, suurta mekaanista rasitusta koneistossa ja suuren ylijännitepiikin generaattorin napapyörässä. (ST-käsikirja 31 2000, s. 69.)

Porvoon jalostamolla dieselgeneraattorit toimivat omissa saarekkeissaan, mutta kytkentätilannetta muuttamalla voitaisiin mahdollistaa dieselgeneraattoreiden rinnankäynti. Varavoimaverkon dieselgeneraattorit eivät kuitenkaan ole samankokoisia. Pienin dieselgeneraattori on nimellisteholtaan 325 kVA, kun suurin dieselgeneraattori on nimellisteholtaan 2500 kVA. Suurin dieselgeneraattori on nimellisteholtaan siis noin kahdeksan kertaa suurempi kuin jalostamon pienin dieselgeneraattori ja rinnankäyntitilanteessa pätö- ja loistehon tasainen jakaantuminen dieselgeneraattoreiden kesken olisi hankalaa. Tehonjaon lisäksi ongelmaksi voisi muodostua generaattoreiden maadoitusjohtimien kautta kulkeva virta. Generaattoreiden tuottamien vaihejännitteiden suuruuksissa ja aaltomuodoissa on aina jonkin verran eroa ja ne voivat saada aikaan virran generaattoreiden välillä generaattoreiden välisissä maadoitusjohtimissa. Maadoitusjohtimissa esiintyvää virtaa voisi pienentää generaattoreiden ja maadoitusjohtimen väliin asennettavalla vastuksella, mutta se vaikeuttaisi maasulkujen havaitsemista varavoimaverkossa. (Hoevenaars, A. 2011.)

Generaattoreissa käytetään polttoaineena dieseliä sen hinnan ja ominaisuuksien takia. Dieselillä tuli- ja räjähdysriskit ovat huomattavasti alhaisempia kuin bensiinimootoreilla. Bensiinigeneraattoreilla saavutettaisiin nopeampi käynnistysaika ja pienemmät asennuskustannukset kuin dieselgeneraattoreilla, mutta kokonaisuhyödyn kannalta dieselgeneraattorit ovat kannattavampia. (IEEE Std. 446-1995 2000.)

3.2.1 Dieselgeneraattorin rakenne

Dieselgeneraattori koostuu dieselmootorin ja tahtigeneraattorin yhdistelmästä. Näiden lisäksi varavoimalaitoksen laitteisiin voidaan lukea ohjaus- ja valvontakojeistot sekä apujärjestelmät. Kuvassa 3.1 on esitetty dieselgeneraattorin pakettimalli, jossa pääosa laitteista on asennettu tehtaalla samalle alustalle yhdeksi kokonaisuudeksi. (ST-käsikirja 31, s.36.)



Kuva 3.1. Varavoimakoneen pakettimallin rakenneosat: 1. Muototeräsalusta, 2. Tärinäeristimet, 3. Dieselmoottori, 4. Generaattori 5. Ohjaus- ja valvontakojeisto, 6. Akusto, 7. Säiliö, 8. Täyttöpumppu, 9. Puhallin, 10. Jäähdytin, 11. Paljeputki, 12. Äänenvaimennin, 13. Kiilaputki, 14. Poistoilmakanava, 15. Kiertoilmapelti, 16. Poistoilman sulkupelti, 17. Raitisilman sulkupelti, 18. Säleikkö, 19. Pakoputki, 20. Eristetty läpivienti (ST-käsikirja 31, s. 36.).

Voimansiirto dieselmoottorin ja generaattorin välillä toteutetaan yleensä joustavan kytkimen välityksellä. Dieselgeneraattori voidaan toteuttaa myös siten, että dieselmoottori ja tahtigeneraattori on kytketty suoraan yhteen. Tällöin generaattorin tarvitsee olla vain yksilaakerinen. (ST-käsikirja 31, s. 43.)

Runko- ja alustarakenteena käytetään yleisesti teräspalkkialustaa, jonka välityksellä dieselgeneraattoriyhdistelmä lepää rakennuksen lattialla. Käyntitärinän eristiminä käytetään yleisesti kumielementtityyppisiä eristimiä. Tärinä johtuu pääosin dieselmoottorin vapaista massavoimista ja momenteista. (ST-käsikirja 31, s. 43.)

3.2.2 Dieselmoottori

Dieselmoottoriin rakenteeseen katsotaan kuuluvaksi painevoitelu-, polttoaine-, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmä. Näiden lisäksi moottoriin kuuluvia laitteita ovat käynnistysmoottori, latausgeneraattori, akusto, suodattimet voiteluöljylle, polttoaineelle ja palamisilmalle, ohjausautomaatti sekä erilaiset mittarit, mittalaitteet ja anturit. (ST-käsikirja 31, s. 44.)

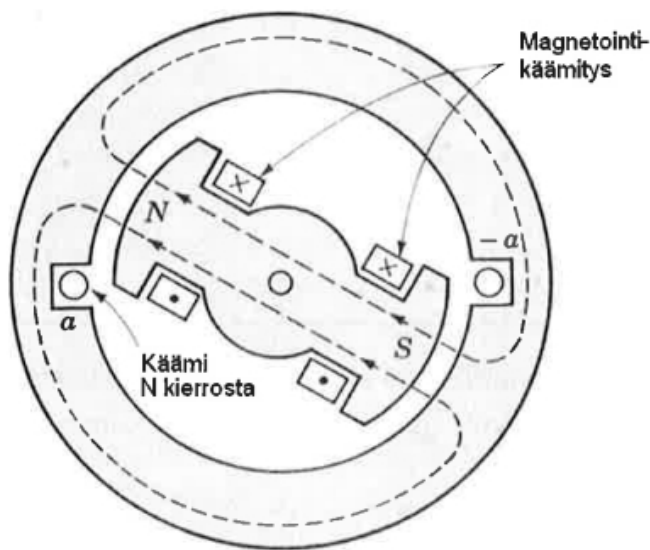
Dieselmoottoreiden koko ja rakenne vaihtelevat suuresti, koska valmistajia, teholuokkia ja moottorityyppejä on paljon. Yleisesti käytettyjä moottorityyppejä ovat 3-, 4- ja 6-sylinteriset rivimoottorit sekä V8- ja V12-moottorit. Dieselmoottoreita valmistetaan vapaasti hengittävinä sekä ahdettuina. Vapaasti hengittävät moottorit voivat ottaa koko nimelliskuorman kerralla, kun taas ahdetut moottorit voivat ottaa 60 - 70 % nimelliskuormastaan kerralla. Tämä johtaa usein varavoimaverkon kuormien portaittaiseen kytkemiseen. Nykyään käytetään useimmiten turboahdettuja moottoreita, kun halutaan pienentää moottoreiden kokoa ja valmistuskustannuksia. (ST-käsikirja 31, s. 43.)

Dieselkäyttöisiä varavoimamoottoreita valmistetaan avoimella rakenteella sekä koteloituina. Avoimet mallit soveltuvat sisätiloihin ja ne ovat halvempia kuin koteloit

mallit. Koteloidun mallin käyttö on perusteltua, jos varavoimakoneisto halutaan sijoittaa ulkotiloihin tai jos halutaan pienentää meluhaittoja.

3.2.3 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattori on laite, jossa muuttuva magneettikenttä synnyttää generaattorin napojen väliin jännitteen. Suurilla virroilla toimivat vaihtovirtakoneet on toteutettu siten, että jännite indusoituu paikallaan pysyvään staattoriin, roottorin pyöriessä nopeudella n . Vaihtovirtakoneen ankkuri on siis staattorissa, tällä vältetään suurien virtojen siirtämiseltä pyörivästä ankkurista sähkölaitteiden käyttöön. Kuva 3.2 esittää yksinkertaista tahtigeneraattorin toiminnan perusperiaatetta. (Bastman 2011, s. 67.)



Kuva 3.2. Periaatekuva tahtigeneraattorista (Bastman 2011, s. 68.).

Kuvassa 3.2 jännite indusoituu tahtigeneraattorin staattoriin (ankkuriin), kun sen sisällä pyöritetään magnetoitua roottoria. Roottorin magnetointi voidaan toteuttaa joko kestopagneeteilla tai tasavirralla. Käytettäessä kestopagneetteja, tahtigeneraattorin magnetoinnin säätö on ongelmallista verrattuna tasavirralla toteutettuun magnetointiin. (Bastman 2011, s. 67.)

Kuvassa 3.2 tahtigeneraattorin ankkurikäämi koostuu N :stä kierroksesta ja ne on sijoitettu symmetrisesti uriin staattorin vastakkaisille sivuille. Kuvan esimerkissä yhden vaiheen ankkurisauvat a ja A ovat koneen akselin suuntaisia saman käämin eri sivuja ja ne on kytketty sarjaan koneen päädyssä. Niihin indusoiduvien jännitteiden suunnat ovat vastakkaiset. Magnetointikäämien synnyttämä vuo on esitetty katkoviivalla, se kulkee roottorista ilman läpi staattorirautaan ja siitä taas ilmapälin kautta takaisin roottoriin. (Bastman 2011, s. 68.)

Tahtigeneraattorin pyörimisnopeus n_s on sidoksissa sähköverkon taajuuteen yhtälön (3.1) mukaan.

$$n_s = \frac{60f}{p}, \quad (3.1)$$

missä n_s on tahtinopeus, f on taajuus ja p on napapariluku.

Kuvan 3.2 tahtigeneraattorissa on kaksi magneettinapaa, joten napapariluvuksi saadaan yksi. Yhtälön (3.1) mukaisesti, kuvan 3.2 tahtigeneraattorin pitäisi pyöriä 3000 r/min, jotta verkon taajuus olisi 50 Hz.

Dieselmootoreiden nimellispyörimisnopeus on tavallisesti 1500 r/min. Tällöin generaattorissa pitää olla napapareja kaksi kappaletta, jotta verkon taajuudeksi saataisiin 50 Hz. ST-käsikirja 31, varavoimalaitokset -kirja suosittelee käytettäväksi harjatonta rakennetta olevaa kolmivaiheista sisänapatahtigeneraattoria, jonka nimellistaajuus on 50 Hz ja joka on itseherätteinen ja itsesäätöinen. (ST-käsikirja 31, s. 47.)

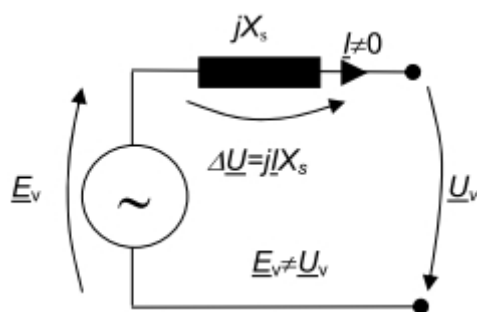
3.2.4 Kuormitetun tahtigeneraattorin mallintaminen

Tahtigeneraattorin toimiessa tyhjäkäynnillä on generaattorin navoissa vaikuttava vaihejännite sama kuin generaattorin lähdejännite. Kun generaattoria kuormitetaan, kulkee kuormitusvirta staattorin kolmivaihekäämityksen läpi aiheuttaen generaattorin ilmäväliin pyörivän magneettikentän. Kuormitusvirran aiheuttaman magneettivuoaaallon ja roottorin magnetoinnin aiheuttaman magneettivuoaaallon välillä on magneettinen kytkentä. Kuormitusvirran aiheuttama magneettivuo pyrkii jarruttamaan roottorin pyörimistä sitä enemmän, mitä enemmän generaattoria kuormitetaan ja näin ollen mitä suurempi on kuormitukseen menevä pätövirta. Järjestelmän taajuus halutaan kuitenkin pitää vakiona ja siksi roottorin pyörimisnopeuden on pysyttävä vakiona. Jotta roottorin pyörimisnopeus pysyisi vakiona, on kuormitusvirran aiheuttama roottorin pyörimisnopeutta jarruttava vaikutus kumottava ottamalla dieselmoottorilta lisää vääntömomenttia. (Nousiainen 2012a, s. 8-8.)

Generaattorin sijaiskytkennässä ilmävälissä magneettikenttien välityksellä tapahtuva vuorovaikutus mallinnetaan tahtireaktanssilla X_s . Staattorin käämityksissä kulkema kuormitusvirta puolestaan kohtaa johtimien resistanssin R_a . Tahtigeneraattorin kokonaisimpedanssi \underline{Z}_t voidaan näin ollen laskea kaavalla (3.7). (Nousiainen 2012a, s. 8-8.)

$$\underline{Z}_t = R_a + jX_s. \quad (3.2)$$

Tahtigeneraattorin käämitysten resistanssi on reaktanssiin verrattuna pieni ja se voidaan usein jättää huomioimatta. Kuvassa 3.3 on esitetty kuormitetun tahtigeneraattorin yhden vaiheen sijaiskytkentä. (Nousiainen 2012a, s. 8-8.)



Kuva 3.3. Kuormitetun tahtigeneraattorin yhden vaiheen sijaiskytkentä (Nousiainen 2012a, s. 8-8.).

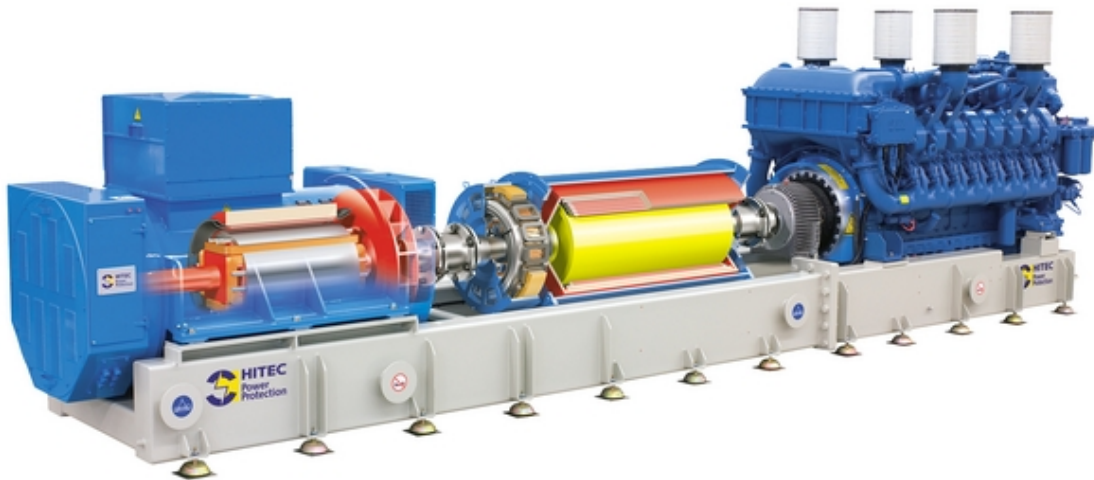
Kuvassa 3.3 on jätetty kuormitusvirran kokema resistanssi R_a huomioimatta. Kuormitusvirran kulkiessa generaattorin tahtireaktanssin X_s läpi, syntyy jännitehäviötä, jonka vuoksi generaattorin liittimissä vaikuttava napajännite \underline{U}_v ei ole yhtä suuri kuin lähdejännite \underline{E}_v . Napajännitteeksi saadaan kuvan 3.3 mukaisesti $\underline{U}_v = \underline{E}_v - jI X_s$. (Nousiainen 2012a, s. 8-8.)

3.2.5 Dynaaminen UPS-järjestelmä

Moottorigeneraattorit ovat järjestelmiä, joissa pyörivä AC generaattori tuottaa käytettävän tehon. Jos järjestelmään lisätään akut, jotka mahdollistavat katkeamattoman sähkönsyötön, järjestelmästä tulee UPS, eli järjestelmällä on katkeamaton tehonsyöttö. Aina ei kuitenkaan haluta käyttää akkuja, tällöin energia voidaan varastoida pyörivään massaun, joka voi toimia erillisenä kokonaisuutena tai se voi olla kiinni moottorigeneraattori-yhdistelmässä. Jälkimmäisessä tapauksessa puhutaan dieselpyörivästä UPS:sta, eli DRUPS:sta. (IEEE Std. 446-1995 2000.)

Kineettisessä energiavarastossa energia varastoituu vauhtipyörään, jonka nopeus voi olla useita tuhansia kierroksia minuutissa. Normaalitoiminnassa kineettinen akku toimii siis sähkömoottorina, joka ottaa tehoa verkosta. Vikatilanteessa tehon suunta muuttuu ja laite toimii generaattorina. Tällöin vauhtipyörään varastoitunut energia syötetään kriittisille kuormille. Vikatilanteen poistuttua, kineettisestä akusta tulee taas moottori ja sen vauhtipyörä kiihdytetään takaisin nimelliseen pyörimisnopeuteen. (IEEE Std. 446-1995 2000; PILLER 2012.)

Markkinoilla on tarjolla yhdistelmiä, joissa kineettinen akku on integroitu dieselgeneraattoriin. Vikatilanteissa energia otetaan yhdistelmän pyörivästä massasta. Kineettinen massa koostuu moottorin ja generaattorin roottoreista sekä akseleista ja mahdollisesta vauhtipyörästä. Kineettisellä energialla voidaan kattaa varavoimaverkon tarvitsema teho joitain sekunteja. Jos vika kestää pidemmän aikaa, kuormitus siirtyy dieselgeneraattorille. Vian pitkittyessä dieselmoottori alkaa syöttää kuormitusta sekä lataamaan kineettistä akkua. DRUPS-järjestelmissä dieselmoottori käynnistetään vain silloin, kun se on tarpeellista ja käynnistykseä tulee huomattavasti vähemmän kuin perinteisissä UPS-varavoimajärjestelmissä. Kuvassa 3.4 on esitetty erään valmistajan dieselgeneraattori, johon on integroitu kineettinen akku. (PILLER 2012.)



Kuva 3.4. Erään valmistajan DRUPS -laitteisto (HITEC 2012.).

Kuvassa 3.4 on esitetty DRUPS-laitteiston rakenne. Laitteisto koostuu kolmesta pääosasta. Oikealla on dieselmoottori, joka on liukukytkimen välityksellä kiinni kineettisessä akussa. Kineettisen akun akseli on puolestaan kiinni vaihtovirtageneraattorin akselissa.

DRUPS:n etuina voidaan mainita hyvä hyötysuhde, hyvä virransyöttökyky, lähtevän jännitteen puhdas siniaaltomuoto ja UPS-varavoimajärjestelmää pienempi tilan tarve, kun vältetään akkujen käytöltä. Huonoa laitteessa on laakereiden kulumisen sekä suhteellisen korkea hankintahinta. DRUPS-yksiköitä voidaan asentaa rinnakkain ja näin päästään huomattaviin tehoihin, laitteisto voidaan asentaa myös keskijänniteverkkoon. (PILLER 2012.)

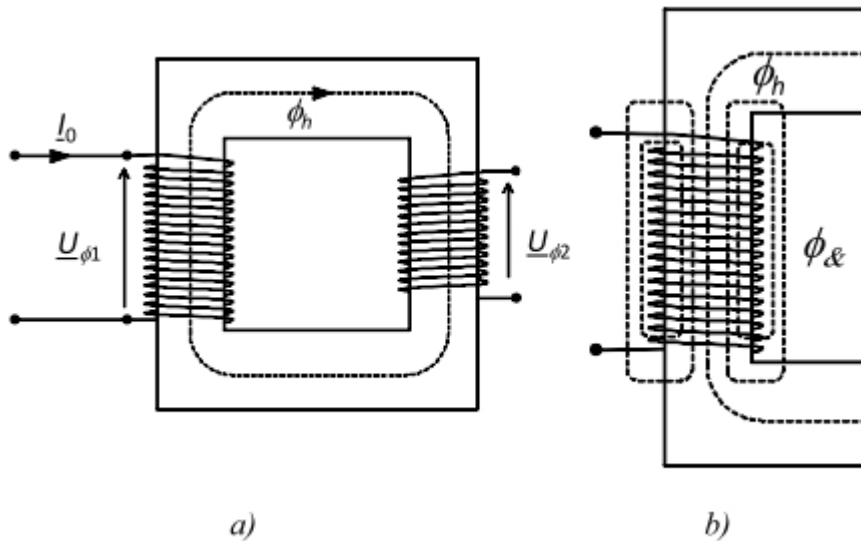
3.3 Muuntajat

Vaihtosähköverkoissa jännitetason muuntaminen halutulle tasolle tapahtuu muuntajilla. Muuntajat ovatkin verkon keskeisiä komponentteja. Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioilmiöön, jossa sinimuotoisesti muuttuva magneettivuo indusoi vaikutuskentässään olevaan suljettuun virtapiiriin virran tai avoimeen virtapiiriin silmukan päiden välille jännitteen. Jos muuttuva magneettivuo vaikuttaa käämiin, jonka kierrosluku on N , indusoituu käämin päiden välille jännite u kaavan (3.3) mukaisesti, missä Φ on ajan suhteen muuttuva magneettivuo ja t on aika. (Nousiainen 2012a, s. 7-1.)

$$u = N \frac{d\phi}{dt}. \quad (3.3)$$

Muuntajan toimintaperiaatetta tarkastellaan yleensä yksivaiheisen muuntajan kyt-kentänä, samat ilmiöt ovat havaittavissa kolmivaiheisissa muuntajissa. Muuntajan rakenne kuvataan usein kuvalla, jossa ensiö- ja toisiokäämitys ovat eri pylväillä. Todellisuudessa muuntajan käämit ovat kuitenkin sisäkkäin samalla pylväällä, jotta niiden läpi kulkisi sama magneettivuo. (Nousiainen 2012b, s. 59.)

Yksinkertaistetuissa muuntajatarkasteluissa oletetaan, että koko magneettivuo kulkee rautasydämen kautta, jolloin ensiö- ja toisiokäämin läpi kulkee sama päävuo Φ_h , kuten kuvassa 3.5 a) on esitetty. (Nousiainen 2012b, s. 59.)



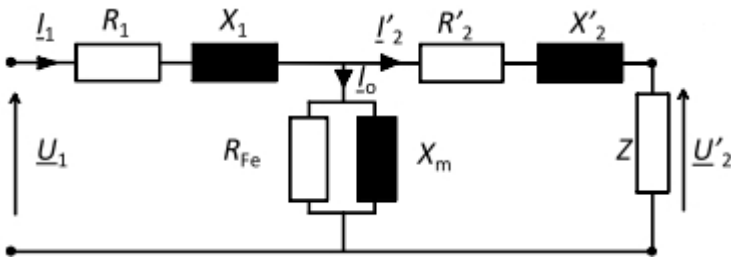
Kuva 3.5. a) Yksinkertaistettu kuva yksivaihemuuntajasta, ei hajavuota b) Hajavuo sulkeutuu ilman kautta (Nousiainen 2012b, s. 59.).

Hajavoiden vuoksi magneettivuo ei kuitenkaan ole samansuuruinen koko magneettipiirin matkalta. Osa ensiökäämin muodostamasta vuosta sulkeutuu ilman kautta, kuten kuvassa 3.5 b) on esitetty. Tällöin toisiokäämiin kautta kulkeva vuo ei ole samansuuruinen kuin ensiökäämin kautta kulkeva vuo. Ensiö- ja toisiokäämin ollessa samalla pylväällä, menee hajavuo pääosin molempien käämien läpi. (Nousiainen 2012b, s. 59.)

3.3.1 Muuntajan sijaiskytkentä

Muuntajatarkasteluissa ja -laskuissa käytetään usein apuna yksivaiheisia sijaiskytkentöjä. Symmetrisissä tapauksissa myös kolmivaiheiset muuntajat voidaan mallintaa niiden yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Sijaiskytkentöjen avulla voidaan huomioida muuntajissa syntyvät häviöt sekä pää- ja hajavuot. (Nousiainen 2012b, s. 69.)

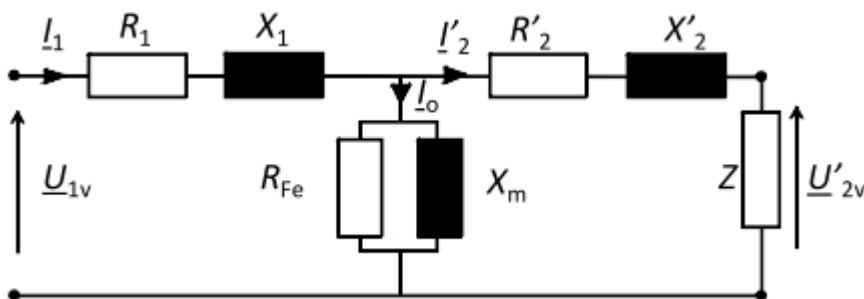
Kuvassa 3.6 on esitetty kuormitetun muuntajan yksivaiheinen sijaiskytkentä, jossa toisiosuureet on redusoitu vastaamaan ensiökäämin kierroslukuja. Näin muuntajan sijaiskytkennässä ensiön ja toisio- kierrosluvut ovat ikään kuin samansuuruiset ja näin ollen niiden välinen muuntosuhde olisi yksi. Tosion virta, jännite ja impedanssit muunnetaan todellisten käämikierroslukujen avulla tätä muuntosuhdetta vastaaviksi. Redusoidut suureet erotetaan alkuperäisistä suureista lisäämällä alkuperäiseen suureeseen pilkku merkin oikeaan yläreunaan. (Nousiainen 2012b, s. 63.)



Kuva 3.6. Sijaiskytkentä yksivaiheiselle ensiön jännitetasoon redusoidulle kuormitetulle muuntajalle (Nousiainen 2012b, s. 66.).

Kuvassa 3.6 muuntajan ensiökäämin virran I_1 kohtaamaa resistanssi kuvataan R_1 :n avulla ja hajavuon aiheuttama hajareaktanssi kuvataan X_1 :n avulla. Vastaavasti toisiokäämin virran I'_2 kohtaama resistanssi kuvataan R'_2 :n avulla ja hajareaktanssin aiheuttama hajavuo kuvataan X'_2 avulla. Tyhjäkäyntivirran I_0 voidaan ajatella jakautuvan puhtaasti resistiiviseen virtaan I_{Fe} , joka kulkee poikittaishaaran resistanssin R_{Fe} läpi ja magnetointivirtaan I_m , joka kulkee päämagnetointireaktanssin X_m läpi. Muuntajan toisiin kytketty kuorma on kuvattu impedanssin Z avulla. Jännitteet \underline{U}_1 ja \underline{U}'_2 kuvaavat muuntajan ensiö- ja toisiopuolen pääjännitteitä. (Nousiainen 2012b, s. 66.)

Symmetrisissä tilanteissa kolmivaiheinen muuntaja voidaan mallintaa sen yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Kuvassa 3.6 esitettyä yksivaiheista sijaiskytkentää voidaanakin käyttää pienillä muutoksilla kolmivaiheisia muuntajia laskettaessa. Kolmivaihemuuntajan tarkasteluissa voidaan käytännössä käyttää kuvan 3.6 sijaiskytkentää, kun pääjännitteiden \underline{U}_1 ja \underline{U}'_2 tilalla käytetään vaihejännitteitä \underline{U}_{1v} ja \underline{U}'_{2v} . (Nousiainen 2012b, s. 66.)



Kuva 3.7. Ensiön jännitetasoon redusoitu yksivaiheinen sijaiskytkentä kuormitetulle kolmivaihemuuntajalle (Nousiainen 2012b, s. 70.).

Symmetrisissä tilanteissa kolmivaihemuuntaja voidaan esittää sen yksivaiheisella sijaiskytkennällä. Kuvassa 3.7 on esitetty ensiön jännitetasoon redusoitu yksivaiheinen sijaiskytkentä kolmivaihemuuntajalle. Käytännössä kolmivaiheinen muuntaja ei ole symmetrinen kaikkien vaiheiden kesken muuntajan rakenteen vuoksi. Muuntajassa aiheutuva epäsymmetria on kuitenkin niin vähäistä, että se voidaan useimmiten jättää huomioimatta. (Nousiainen 2012b, s. 69.)

3.3.2 Muuntajan oikosulkuimpedanssi

Muuntajissa ei yleensä ilmoiteta niiden oikosulkuresistanssia ja -reaktanssia suoraan ohmiarvoina, koska niiden arvo riippuu siitä, tarkastellaanko muuntajaa sen ensiö- vai toisiopuolelta. Eli toisinsanoin laaditaanko sijaiskytkentä muuntajan ensiö- vai toisiopuolelle redusoituna. Valmistaja ilmoittaa yleensä vain muuntajan suhteellisen impedanssin eli oikosulkuimpedanssin, joka merkitään joko u_k tai z_k . Suhteellisen oikosulkuimpedanssin yksikkönä on %. Muuntajan impedanssi saadaan laskettua, kun tiedetään suhteellisen oikosulkuimpedanssin lisäksi muuntajan nimellisjännitteet ja nimellisteho tai muuntajan nimellisimpedanssi. Muuntajan oikosulkuimpedanssi saadaan tällöin laskettua (Nousiainen 2012b, s. 68.)

$$Z_k = \frac{z_k}{100} Z_n = \frac{z_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n}. \quad (3.4)$$

Määritettäessä impedanssia ensiöpuolelta katsottuna, pitää kaavaan (3.4) sijoittaa nimellisjännitteen U_n arvoksi muuntajan ensiöpuolen nimellisjännite. Vastaavasti laskettaessa muuntajan impedanssia toisiopuolelta, pitää kaavaan (3.4) sijoittaa nimellisjännitteen paikalle toisiopuolen nimellisjännite. Simulointiohjelmistoissa, kuten NEPLAN:ssa, usein riittää pelkkä suhteellisen oikosulkuimpedanssin ilmoittaminen. Ohjelma laskee itse impedanssin käyttäjän antamien jännitteiden ja tehon avulla.

3.3.3 Muuntajan jänniteenalenema ja häviöt

Kuormitusvirran \underline{I} kulkiessa muuntajan käämien läpi, muuntajassa syntyy muuntajan resistanssin ja reaktanssin vaikutuksesta sisäisiä jännitehäviöitä. Kuormitusvirran aiheuttama jännitehäviö voidaan laskea käyttäen hyväksi kuvan 3.7 mukaista kolmivaihemuuntajan sijaiskytkentää. Kolmivaihemuuntajan yhdessä vaiheessa tapahtuva jännitehäviö voidaan laskea ohmin lain mukaisesti kaavalla (3.5), kun $R_k = R_1 + R_2'$ ja $X_k = X_1 + X_2'$ (Nousiainen 2012b, s. 72.)

$$\Delta U_{hv} = \underline{I} \cdot \underline{Z}_k = \underline{I}(R_k + X_k). \quad (3.5)$$

Kaavasta (3.5) saadaan muuntajan jännitehäviö tarkassa muodossa. Usein kuitenkin tyydytään pienempään tarkkuuteen ja muuntajan jännitteenalenema halutaan tietää muuntajan ensiö- ja toisiopuolen jännitteiden itseisarvojen erotuksena, eli muuntajassa syntyvä jännitteenalenema voltteina tai prosentteina laskettuna. Tällöin jännitteenalenema voidaan laskea likiarvoyhtälöstä, jossa φ on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma. (Nousiainen 2012b, s. 72.)

$$U'_{hv} = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi. \quad (3.6)$$

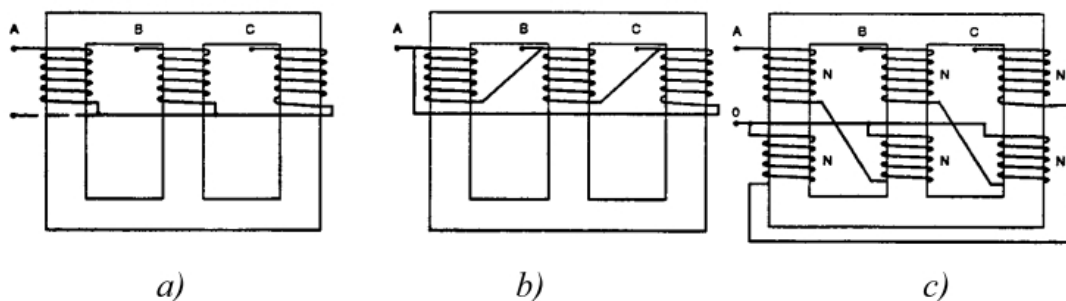
Yhtälön (3.6) käyttö on usein helpompaa kuin yhtälön (3.5) käyttö, sillä likiarvo-kaavaa käyttäessä laskuja ei tarvitse suorittaa osoitinmuodossa, vaan voidaan käyttää suureiden itseisarvoja. Muuntajien häviöt koostuvat kahdesta eri osasta, tyhjäkäyntihäviöistä sekä kuormituksesta aiheutuvista häviöistä. Muuntajan tyhjäkäyntihäviöiden suuruuteen vaikuttaa pääasiassa muuntajan jännite, kun taas kuormitushäviöiden suuruuteen vaikuttaa muuntajan kuormitusvirta. Muuntajan valmistaja ilmoittaa kilpiarvoissa muuntajalle nimelliskuormahäviöt P_{kn} sekä tyhjäkäyntihäviöt P_o . Kun tiedetään muuntajan kuormitus S ja nimelliskuormitus S_n voidaan kuormitushäviöt P_k laskea kaavan (3.7) mukaisesti. (Nousiainen 2012b, s. 74.)

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 P_{kn}. \quad (3.7)$$

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt eli rautahäviöt syntyvät muuntajan rautasydämessä magneettivuon vaihtelusta aiheutuvina hystereesi- ja pyörrevirtahäviöinä. Tyhjäkäyntihäviöt ovat pienissä muuntajissa tyypillisesti suuruusluokkaa 1,3...2 % ja suuremmissa muuntajissa luokkaa 0,2...0,5 %. Kuormitushäviöt ovat tyypillisesti pienissä muuntajissa suuruusluokkaa 4...5 % ja suuremmissa muuntajissa luokkaa 0,5...0,7 %. (Sähköasennustekniikka 3 1998.)

3.3.4 Kolmivaihemuuntajan kytkennät ja kellolukemat

Suomessa käytetään pääsääntöisesti kuvan 3.8 mukaista sydänmuuntajarakennetta. Kolmivaihemuuntajalla on jokaisella pylväällä tavallisesti vähintään kaksi käämistä, ylä- ja alajännitekäämitykset. Käämitysten kytkentänä käytetään joko tähti- tai kolmiokytkentää. Hakatähti on näiden kahden yhdistelmä. Alajännite voi olla myös jaettu kierrosluvultaan kahteen yhtä suureen osaan, jolloin toisiossa voidaan käyttää hakatäh- tikytkentää. Kuvassa 3.8 on esitetty peruskytkennät yläjännitekäämityksille. (Nousiainen 2012b, s. 75.)



Kuva 3.8. Kolmivaihemuuntajan peruskytkennät, a) tähti [D], b) kolmio [Y] ja c) hakatähti [Z] (Nousiainen 2012b, s. 75.).

Tyypillisimmät jakelumuuntajilla käytetyt kytkentäyhdistelmät Suomessa ovat Dyn11 ja Yzn11. Yd11 kytkentää käytetään kaukovoimansiirrossa, välijänniteverkoissa

ja generaattorimuuntajissa. Yhdistelmän alussa oleva iso kirjain kertoo miten muuntajan ensiö on kytketty, ensimmäinen pieni kirjain kertoo miten muuntajan toisio on kytketty. Muuntajan kytkentätunnuksessa esiintyvä mahdollinen N tai n kirjain ilmaisee, onko muuntajan tähtipiste tuotu muuntajan kannelle ensiö- tai toisiopuolelta. Muuntajan kytkentätunnuksen lopussa esiintyvä numero on muuntajan kellolukema. (Nousiainen 2012b, s. 75.)

Eri kytkennöillä on etuja ja haittoja. Tähtikytkenällä on nollapiste käytettävissä, jolloin saadaan kaksi eri jännitettä käyttöön. Se sopii myös suurille jännitteille ja koh- tuullisille virroille. Tähtikytkeä mahdollistaa myös vastuksen tai reaktorin kytkennän tähtipisteen ja maan välille. Kolmiokytkennässä on vain yksi jännite käytettävissä, sillä siinä ei ole tähtipistettä. Käämijännite on siis samalla pääjännite ja näin ollen tarvitaan paremmat muuntajan sisäiset eristykset. Kolmiokytkennällä voidaan vaimentaa haitallista nollajohtimeen summautuvaa kolmatta yliaaltoa. Hakatähtikytkenässä on hankalimmat sisäiset kytkennät kuin kahdessa muussa kytkennässä. Hakatähtikytkenällä voidaan kuitenkin tasoittaa epäsymmetrisen kuorman vaikutuksia, johdon kannalta kytkentä vastaa tähtikytkeä. (Nousiainen 2012b, s. 76.)

Kolmivaihemuuntajissa yleisesti käytettäville peruskytkennöille, kuten Dy-, Yd- ja Yz- kytkennöille, on ominaista, etteivät ensiön ja toisio- vaihejännitteet ole samassa vaiheessa, vaan niiden välillä on vaihesiirtoa. Vaihesiirrot ovat 30° kerrannaisia, eli 30° , 60° , 90° jne. Kokonainen ympyrä, kuten kellotaulu, on 360° ja sen voi jakaa 30° kerrannaisilla kahteentoista osaan. Kellotaulun tapauksessa kahteentoista tuntiin, yksi tunti vastaa siis 30 astetta. Kellolukemilla voidaan siis kuvata kolmivaihemuuntajien tavan- omaisten kytkentöjen yhteydessä esiintyviä ensiön ja toisio- vaihejännitteiden välisiä vaihesiirtoja. Esimerkiksi yleisesti käytetyllä Dy11 kytkennällä toisio- vaihejännite on $11 \cdot 30^\circ$, eli 330° jäljessä vastaavasta ensiön vaihejännitteestä. (Nousiainen 2012b, s. 76.)

Tehonjaon laskennassa muuntajien aiheuttamaa vaihesiirtoa ei tarvitse ottaa huomi- oon, mutta epäsymmetrisiä vikoja laskettaessa vaihesiirto on huomioitava. Käsien lasket- taessa usein riittää pelkkä vikavirran itseisarvo, mutta jos vikavirtojen kulmat halutaan oikein, pitää muuntajien aiheuttama vaihesiirto ottaa huomioon. Myöhemmin esiteltä- vissä myötä- ja vastaverkoissa, muuntajien aiheuttamat vaihesiirrot ovat vastakkais- merkkisiä. (Bastman 2012.)

3.4 Suojalaitteet

Varmennettu jakeluverkko voi olla joko identtinen normaalin verkon kanssa tai se voi olla osa normaalista verkosta, kuten Porvoon jalostamolla. Varmennetun verkon suoja- ukseen pätevät periaatteessa muuten samat ehdot ja olosuhteet kuin normaaliin verk- koon, sillä poikkeuksella, että varmennetun syötön vikavirran syöttökyky on pienempi kuin normaalissa syöttötilanteessa. Varmennettavia sähkön syöttölähteitä ovat generaatto- rit, UPS-laitteet ja akustot, joiden kaikkien syöttämä oikosulkuvirta jää selvästi normaali- n syöttötilanteen oikosulkuvirrasta. (ST-käsikirja nro 20 2005, s. 149.)

Suojauksia suunniteltaessa on ensisijaisesti täytettävä turvallisuuden edellyttämät vaatimukset toimintojen ja toiminta-aikojen suhteen. Käytön kannalta tärkein tavoite on saada suojaus toimimaan siten, että verkossa olevat kuormitukset voisivat mahdollisimman häiriintymättömästi jatkaa toimintaansa. Varmennettuihin verkkoihin liitetty kuorma, kuten valaisimet, moottorit ja varaajat, usein sietävätkin suojauksien aiheuttamia lyhyitä katkoksia. (ST-käsikirja nro 20 2005, s. 150.)

Luvussa 4.5 on kerrottu erilaisista vikatapauksista, jotka aiheuttavat oikosulun tai maasulun verkkoon. Luvussa 4.5 kerrottujen vikojen lisäksi varavoimaverkossa pitää suojautua ylikuormituksen aiheuttamalta virralta. Nesteen jalostamoilla noudatettavissa spesifikaatioissa on kerrottu, miten eri jännitetasoilla olevien verkkojen suojaus tulisi toteuttaa.

Porvoon jalostamolla 10 kV:n varavoimaverkon oikosulkusuojaus toteutetaan vakioaika ylivirtareleillä, jotka laukaisevat normaaliverkosta tulevan syötön. Kuormaa syöttävien muuntajien suojaus toteutetaan kuormaerottimilla ja sulakkeilla. Ylivirtasuojaus toteutetaan verkkoa syöttävien muuntajien alajännitepuolella olevilla ylivirtasuojauksilla. (N-105 1984.)

Koska 10 kV:n varavoimaverkko on suhteellisen suppea maasta erotettu kaapeli-verkko, sen maasulkuvirrat ovat pieniä. Maasulkusuojaus toteutetaan syöttöpisteen kojeistossa sijaitsevalla maasulkujännitettä mittaavalla jännitereleellä, joka laukaisee normaaliverkon syötön. (N-105 1984.)

Jalostamolla olevat 400 V ja 690 V verkot on käyttömaadoitettu jäykästi muuntajien tähtipisteistä TN-S järjestelmän mukaisesti. Laitekuormien oikosulku- ja maasulkusuojina toimivat katkaisijat, sulakkeet ja johdonsuoja-automaatit. Pääsääntöisesti kaapelien oikosulku- ja ylikuormitussuojina toimivat sulakkeet ja pääkojeistojen oikosulkusuojina toimivat vakioaika ylivirtasuojat ja ylikuormitussuojina toimivat kään-teisaika ylivirtasuojat. (N-105 1984.)

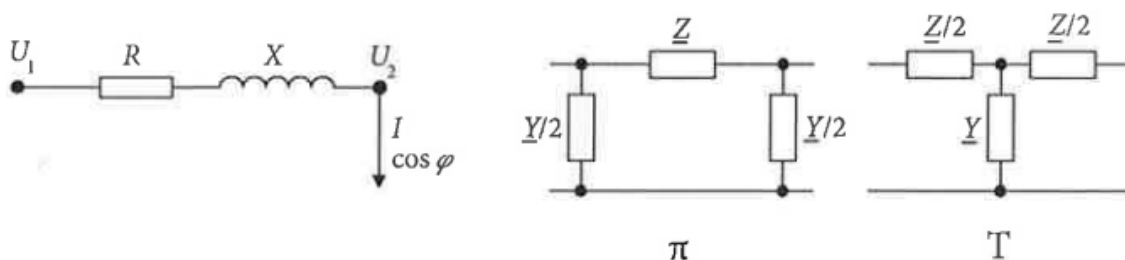
Generaattorien ollessa rinnankäytössä verkon kanssa, suojauksessa pitää kiinnittää huomiota tahdistumisen ja tehon jakaantumiseen. Jotta tahdistumista ja tehon jakaantumista voitaisiin tarkkailla, tarvitaan synkronoskooppi sekä pätöteho- ja loistehomittarit. Tehon jakaantumiseen pitää kiinnittää huomiota kaikenlaisissa kuormitus- ja kytkentätilanteissa. Dieselgeneraattoreiden suojauksissa pitää käyttää myös aikahidastettua takatehosuojaa, joka estää tehon suunnan muuttumisen verkosta generaattorille. Tällä varmistetaan, ettei generaattori ala pyörittää dieselkonetta. (ST-käsikirja 31 2000, s. 70.)

3.5 Johdot ja kaapelit

Jalostamolla käytetään muuntamoiden välisessä tehonsiirrossa PVC-päällysteisiä alumiini- ja kuparivoimakapeleita. Kaapelit kulkevat pääosin maan alla johtokouruissa, jotka on täytetty hiekalla. Verkostolaskentaa varten kaapeleista pitää tietää resistanssi, reaktanssi, kapasitanssi ja konduktanssi. Johtovakioiden arvoihin vaikuttavat johtimen materiaali, rakenne, sijoitus, verkon taajuus ja monet muut asiat.

Virtapiirilaskelmia varten jakeluverkon komponentit mallinnetaan resistansseista, reaktansseista ja admittansseista muodostuvilla sijaiskytkennöillä. Verkon malli koostuu toisiinsa kytkettyjen komponenttien malleista. Laskentatehtävän tyyppi ja vaadittava tarkkuus määräävät, miten yksinkertaista mallia voidaan käyttää. Jalostamon varavoi-maverkossa kaapeleiden pituudet ovat suhteellisen lyhyitä ja jännitteet korkeimmillaan 10 kV. Näin ollen, käsin laskennassa voitaisiin tyytyä johdon sijaiskytkennän yksinkertaiseen malliin, joka on esitetty kuvan 3.9 vasemmassa reunassa. NEPLAN ohjelmassa kuitenkin kaikki johto-osuudet voidaan mallintaa tarkemmalla π -sijaiskytkennällä, joka on esitetty kuvan 3.9 keskellä. (Lakervi&Partanen 2008, s. 25.)

Oikosulkuvirta- ja pätötehohäviölaskuissa riittää, että johto kuvataan pitkittäisellä impedanssillaan. Johdon resistanssi määräytyy johdinaineen resistiivisyydestä ja johtimen pinta-alasta sekä pituudesta, kun taas reaktanssi puolestaan liittyy magneettikenttään ja riippuu eniten vaihejohtimien keskinäisistä etäisyyksistä. 50 Hz:n verkoissa ilmajohdon tyypillinen reaktanssi on noin $0,4 \Omega/\text{km}$ ja kaapelin tätä olennaisesti pienempi. Suurvoimansiirtojohdoilla resistanssi voidaan usein jättää huomioimatta suurten johdinpoikkipinta-alojen takia, jakeluverkoissa resistanssin vaikutus pitää kuitenkin ottaa huomioon. Kuvassa 3.9 on esitetty sähköjakelujohdon sijaiskytkentöjä. (Lakervi&Partanen 2008, s. 25.)



Kuva 3.9. Sähköjakelujohdon sijaiskytkentöjä (Lakervi&Partanen 2008, s. 25).

Sähköjakelujohtojen mallit jaetaan tyypillisesti kolmeen osaan johdon pituuden perusteella. Kuvassa 3.9 vasemmalla on esitetty lyhyen johdon, pituus alle 100 km, sijaiskytkentä. Keskellä on keskipitkän johdon, pituus 100 - 250 km, π -sijaiskytkentä ja oikealla on pitkän johdon, pituus yli 250 km, T-sijaiskytkentä. Laskentaohjelmistoissa ei ole tavallisesti jaottelua, vaan tyypillisesti kysytään π -sijaiskytkennän parametrit. (Bastman 2012.)

Maakaapeleiden ja pitkien ilmajohtojen kuvaamisessa johtimien ja maan välisellä kapasitanssilla on jonkin verran vaikutusta jännitteenalenemaan. Kuvan 3.9 π - ja T-sijaiskytkennöillä päästäänkin tarkempiin tuloksiin kuin siirtojohdon yksinkertaisella sijaiskytkennällä. Laskentaohjelmistoissa taajuus oletetaan usein vakioksi, eikä se näin ollen vaikuta johtoimpedanssien suuruuteen. Stabiilisuyslaskennassa verkon taajuus toki muuttuu, mutta yleensä taajuuden muutos on niin pieni, ettei siitä tarvitse välittää. (Lakervi&Partanen 2008, s. 26; Bastman 2012.)

3.6 Kuormat

Varavoimaverkkoon kytketään sellaiset kuormat, joiden toiminta halutaan ylläpitää, vaikka sähkön toimitus normaaliverkosta loppuisi. Yleisesti varavoimaverkon kuormat voivat olla melkein mitä vain sähkölaitteita. Koska diplomityö käsittelee Porvoon jalostamon varavoimaverkkoa, keskitytään työssä jalostamolla oleviin varavoimaverkon kuormiin.

Porvoon jalostamolla varavoimaverkon kuormat koostuvat pääsääntöisesti valaistuksesta, pistorasiaryhmistä, UPS- ja instrumenttilaitteistojen syötöistä sekä erilaisista moottoreista. Suurin osa jalostamon hätäsulkutoiminnoista on paineilmatoimisia ja näin ollen sähköstä riippumattomia, joten välittömästi toimivia laitteita ei pitäisi olla kuormittamassa generaattoreita. (Juusti 2012.)

Varavoimaverkon valaistuksella pyritään ylläpitämään turvallinen työympäristö pimeälläkin säällä. Tärkeillä moottoreilla pyritään varmistamaan jalostamon turvallinen alasajo sekä henkilöhissien toiminta. (Juusti 2012.)

3.6.1 Kuormien mallintaminen

Varavoimaverkkoon kytkettyjen kuormien mallintaminen on erittäin hankalaa, sillä kuormien suuruus ja luonne muuttuvat jatkuvasti. Teollisuudessa suurimmat kuormat koostuvat kolmivaiheikosulkumoottoreista, mutta jalostamolla varavoimaverkkoon on kytketty myös paljon pieniä muutaman kilowatin suuruisia venttiilimoottoreita, joiden toimintaa on vaikeaa ennustaa. Tutkittaessa verkon tehonjakoa ja stabiilisuutta on tärkeää tietää miten kuormien pätö- ja loisteho käyttäytyvät jännitteen muuttuessa.

Kuormiin liittyvä dynamiikka ei koostu pelkästään moottoreiden nopeista muutosilmiöistä, vaan jännitestabiilisuustarkasteluissa on huomioitava myös hidas jännitteen säätö, termostaattikuormat sekä suojausjärjestelyt, jotka voivat toimia jännitteen aleneman seurauksena alhaisesta jännitteestä johtuen tai ylikuormittumisen seurauksena. Jännitestabiilisuustarkasteluissa pitää huomioida myös purkauslamppujen sammuminen alijännitteellä ja uudelleensyttyminen jännitteen palatessa. Dynaamisia moottorimalleja tarvitaan tarkasteluissa kuitenkin silloin, jos moottorikuorman osuus on huomattava. Oikosulkumoottorit, jotka muodostavat valtaosan moottorikuormasta, kuluttavat paljon loistehoa. Erityisen paljon loistehoa kuluu oikosulkumoottoria käynnistettäessä tai moottorin kipatessa. (SVT-3411 2012.)

Sähkösiirtojärjestelmän laskennassa kuormat kuvataan yleensä suoraan kytkettyinä suurjännitekiskoon. Tällöin kuormat usein oletetaan vakiotehokuormiksi. Vaihtoehtoisesti kuormat voidaan kuvata muuntajien alajännitepuolelle, jolloin kuormien tulee olla jänniteriippuvia ja muuntajien jännitteesäätö on huomioitava laskennassa.

Kuormien jänniteriippuvuuden selvittämiseksi tarkin mahdollinen keino on muuntamokohtaisten mittausten tekeminen. Kattavien mittausten suorittaminen on kuitenkin aikaa vievää, koska kuormitusten jänniteriippuvuus voi muuttua esimerkiksi sääolosuhteiden mukaan. Jänniteriippuvuuden selvittämiseksi tulisi muuntamolla tehdä askelmai-

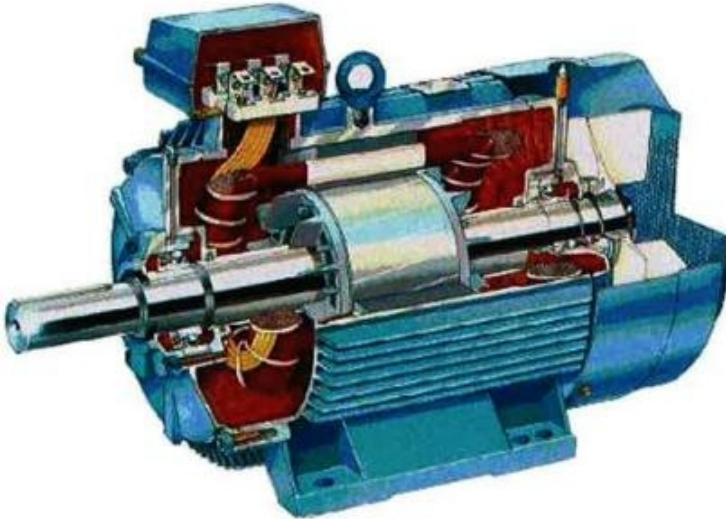
sia jännitemuutoksia, esimerkiksi muuntajan käämikytkintä muuttamalla. (SVT-3411 2012.)

Käytännössä kuormat mallinnetaan komponenttipohjaisella menetelmällä. Kuorma-komponentteja voivat olla esimerkiksi isot ja pienet moottorit, vakiotehokuormat, termostaattikuormat ja kompensointi sekä jakeluverkon jännitteensäätö. Nämä kuorma-komponentit kuvaavat suoraan yksittäisiä verkon laitteita. Niiden määrän ja suhteen arvioinnissa voi olla haasteita, mutta toisaalta näiden komponenttien jänniteriippuvuudesta on olemassa varsin luotettavia taulukoita, jolloin päästään mallinnuksen kannalta luotettaviin tuloksiin. (SVT-3411 2012.)

3.6.2 Oikosulkumoottorit

Teollisuuden puolella ehdottomasti tärkein moottorityyppi on epätahtikone ja erityisesti oikosulkumoottori. Oikosulkumoottorin nimitys tulee moottorin roottorissa olevasta käämityksestä, jonka rakenne on hyvin yksinkertainen. Roottorin urissa olevat sauvat on suljettu molemmista päistä oikosulkurenkaalla ja häkkikäämitys muistuttaakin joskus käytettyä kesyjen oravien juoksuhäkkiä, tästä tulee häkkikäämityksen englanninkielinen nimitys squirrel cage. Oikosulkumoottorin yksinkertainen rakenne tekee siitä erittäin käyttövarman, eikä mikään muu sähkömoottori ole tähän mennessä pystynyt voittamaan sitä käyttövarmuudessa. (Bastman 2011, s. 14.)

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu monivaiheisen, useimmiten kolmivaiheisen, vaihtovirran synnyttämän pyörivän magneettikentän hyödyntämiseen. Häkkikäämityksen sauvan ohi kulkeva pyörivä magneettivuoalto aiheuttaa sauvaan sähkökentän ja edelleen virran, joka pääsee kulkemaan häkkikäämityksen oikosulkurenkään kautta. Virralliseen roottorin sauvaan kohdistuu voima, joka pyrkii pyörittämään roottoria samaan suuntaan kuin staattorin synnyttämä magneettivuoalto, johtimen alkeisvarauksiin kohdistuu tällöin Lorenzin lain mukainen voima. Staattorin kentän pyörimisnopeus voidaan laskea kaavalla (3.1). Kuvassa 3.10 on esitetty oikosulkumoottori avattuna. (Noussiainen 2012a; Bastman 2011.)



Kuva 3.10. Epätahtikoneisiin kuuluva oikosulkumoottori avattuna (Bastman 2011, s. 1).

Oikosulkumoottorin roottori jää aina jonkin verran jälkeen staattorin muodostamasta magneettivuoaallosta, ja roottori pyörii jättämän verran staattorikäämityksen aiheuttamaa magneettivuoaaltoa hitaammin. Jättämä on välttämätöntä koneen toiminnalle, sillä muuten roottorisauva olisi koko ajan samassa kohdassa suhteessa pyörivään magneettivuoaaltoon, eikä sauva tällöin kokisi muuttuvaa magneettikenttää. Tällöin sauvaan ei indusoituisi virtaa, eikä roottoriin syntyisi mitään pyörittävää sivuvaikutusta. Jättämä on isoilla epätahtikoneilla yhden prosentin luokkaa ja pienemmillä koneilla muutamia prosentteja. Jättämä voidaan laskea yhtälön (3.8) avulla. (Bastman 2011; Nousiainen 2012a.)

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (3.8)$$

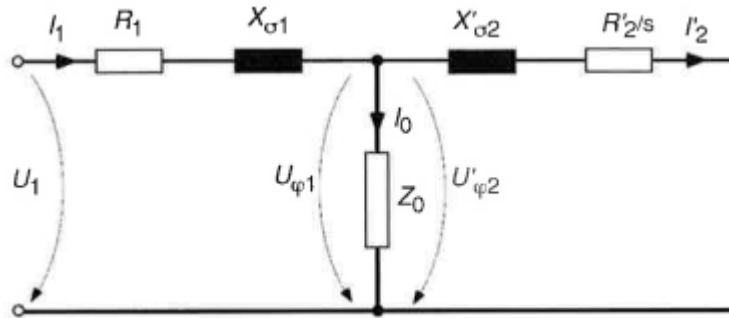
missä s on jättämä, n_s on tahtinopeus ja n on todellinen pyörimisnopeus.

Oikosulkumoottori ottaa käynnistyshetkellä noin 5...7 kertaisen virran suhteessa nimellisvirtaan. Se aiheuttaa hetkellisen jännitteen- ja taajuudenalennuksen. Näistä merkittävämpi tekijä on jännitteenalennus. Jos sähköverkko on heikko tai oikosulkumoottori suuri, saattaa suuri käynnistysvirta häiritä verkon muita laitteita.

Varavoimaverkoissa oikosulkumoottoreiden käynnistykseen pitää kiinnittää erityistä huomiota, sillä suurin oikosulkumoottori, jonka varavoimalaitos pystyy käynnistämään, on 25 % - 35 %:ia varavoimalaitoksen pätötehosta. Tällöin hetkellinen jännitteenalennus on noin 30 %. Sallittaessa enintään noin 20 % jännitteenalennus, pienenee moottorikoko puoleen edellisestä. Oikosulkumoottorin käynnistysongelman ratkaisuja ovat esimerkiksi tähti-kolmiokäynnistys, pehmokäynnistys tai taajuusmuuttajan käyttö. (Bastman 2011; ST-käsikirja 31 2001.)

Kuvassa 3.11 on esitettynä epätahtimoottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä staattori- puolelta katsottuna. Tilannetta voisi tarkastella myös koneen roottorin kannalta, mutta

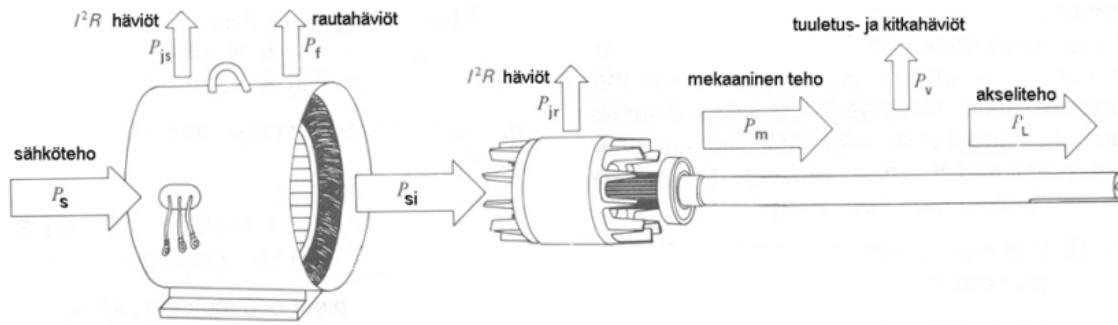
NEPLAN mallinnusohjelmassa epätahtikoneet mallinnetaan syöttämällä staattoripuolen sähköiset arvot.



Kuva 3.11. Moottorin vaiheen sijaiskytkentä staattoripuolelle mallinnettuna (Bastman 2011, s. 48).

Kuvasta 3.11 huomataan, että oikosulkumoottorin sijaiskytkentä staattoripuolelle mallinnettuna muistuttaa kuvassa 3.6 esitettyä muuntajan ensiön jännitetasoon redusoitua sijaiskytkentää. Moottorin sijaiskytkennässä I_1 on staattorivirta ja I_2 on roottorivirta. Moottorin staattoripuolen resistanssia kuvaa R_1 ja roottoripuolen resistanssia kuvaa R'_2/s . Staattorin ja roottorin hajareaktanssit kuvataan termeillä $X_{\sigma 1}$ ja $X'_{\sigma 2}$. $\underline{U}_{\varphi 1}$ on staattorin vaihekäämitykseen vaikuttava vuoajännite eli pyörivän vuontiheysaallon indusoima sähkömotorinen voima ja $\underline{U}'_{\varphi 2}$ on roottoriin indusoituva vuoajännite. U_1 on verkossa vaikuttava vaihejännite ja Z_0 on tyhjäkäynti-impedanssi, jolla huomioidaan koneen rautahäviöt ja sen ottama magnetointivirta.

Oikosulkumoottorin verkosta ottama sähköteho P_s ei välity suoraan akselitehoksi P_L , vaan moottorin läpi tapahtuvaan tehonvirtaukseen liittyy erilaisia häviöitä. Sekä staattorissa että roottorissa tapahtuu virtahäviöitä ja lisähäviöitä. Virtahäviöt syntyvät, kun staattori- tai roottorivirta kohtaa staattorin tai roottorin käämeissä esiintyvän resistanssin. Lisähäviöt aiheutuvat esimerkiksi siitä, että virta ei jakaannu tasaisesti johtimen poikkipinnoille ja siitä, että kuormituksen aiheuttama virta aiheuttaa muutoksia magneettivuossa ja sen tiheydessä. Lisähäviöiden määrittäminen on vaikeaa ja niiden kohdalla on turvauduttava likimääräiseen arviointiin. Näiden lisäksi staattorissa esiintyy rautahäviöitä P_f ja roottorissa esiintyy tuuletus- sekä kitkahäviöitä, jotka on esitetty kuvassa 3.12 termillä P_v . Oikosulkumoottorin tehot ja häviöt on havainnollistettu kuvassa 3.12. (Nousiainen 2012a; Bastman 2011.)



Kuva 3.12. Oikosulkumoottorin tehot ja häviöt (Nousiainen 2012a, s. 8-15.).

Oikosulkumoottorin mallinnuksessa sähköteho, jännite ja virta ovat oleellisia suureita. Edellä mainittujen lisäksi mallinnuksessa halutaan tietää tehokerroin käynnistyksessä sekä normaalitilanteessa. Kuva 3.12 havainnollistaa, mihin kaikkeen sähköverkosta otettu teho kuluu.

3.6.3 Valaistus

Varavoimaan kytketyllä valaistuksella pyritään säilyttämään turvallinen työskentely-ympäristö poikkeustilanteissa. Teiden, prosessialueiden ja teknisten tilojen valaistuksessa käytetään loisteputkia ja suurpainenatriumlamppuja, jotka tuottavat harmonisia yliaaltoja verkkoon ja joiden tehokerroin jää usein melko pieneksi.

Lamput kuluttavat tehoonsa nähden merkittävästi loistehoa, joka on sähköverkkoa kuormittava tekijä. Loistehon tuottaminen generaattoreilla ja loistehon siirto aiheuttavat häviöitä sähköverkossa ja pienentävät siirto- ja tuotantokapasiteettia päätötehon osalta. (Miettinen 2009.)

Loistehon kulutuksen lisäksi lamput aiheuttavat sähköverkkoon harmonisia yliaaltoja. Harmoniset yliaallot ovat verkon perustaajuuden eli 50 Hz:n monikertoja. Yleisimmin esiintyvät monikerrat ovat 150 Hz:n kolmas yliaalto ja 250 Hz:n viides yliaalto. Yliaallot ovat jännitteeseen tai virtaan summautuneita signaaleja ja ne aiheuttavat sinimuotoisen jännite- tai virtasignaalin vääristymistä. (Miettinen 2009.)

Harmoniset yliaallot aiheuttavat häviötä verkossa, muuntajien ylikuormittumista, laitteiden kuormitettavuuden alenemista, mittareiden virhenäyttämiä, suojareleiden virhetoimintoja ja nollajohtimen ylikuormittumista. Lamppujen aiheuttamia verkkovaikutuksia voidaan pienentää kompensointi- ja suodatuslaitteilla. (Miettinen 2009.)

4 TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1 NEPLAN-ohjelma sähköverkon mallinnustyökaluna

NEPLAN on verkostolaskentaohjelmisto sähkö-, vesi- ja kaasuverkkojen suunnitteluun, optimointiin ja simuloimiseen. Se koostuu erilaisista moduuleista, joista ohjelmaa hankittaessa voi valita, mitä ominaisuuksia ohjelmalta halutaan. Ohjelman peruspaketin avulla on mahdollista mallintaa monenlaisia sähköverkoja sekä suorittaa niille erilaisia tarkasteluja ja laskentoja. Johtojen lämpenemisien, maadoituksen, transienttitilojen ja monien muiden tilanteiden tutkimiseen on saatavilla lisäosia. Ohjelmassa on rajaton solmupistemäärä. (NEPLAN 2012.)

NEPLAN:ssa on graafinen käyttöliittymä, minkä ansiosta sähköverkot voidaan mallintaa kaaviotyypin muotoon. Käyttäjän kannalta tämä mahdollistaa havainnollisen työskentelyn ja laskentatulosten tulkin. Verkon solmupisteiden määrää ei ole rajoitettu, joten tarkasteltava verkko on mahdollista mallintaa aina tarkoitukseen sopivalla tarkkuudella. (NEPLAN 2012.)

Porvoon jalostamon varavoimaverkon tarkastelussa on tarkoitus suorittaa NEPLAN:lla verkon jännitteen aleneman, vikavirtojen ja tehonjaon tarkastelut. NEPLAN:ssa on mahdollista valita, millä laskentamenetelmillä tarkasteluja halutaan suorittaa. Ohjelma on suunniteltu kaikenlaiseen verkostolaskentaan ja siksi laskentamenetelmiä on useita. Käyttäjä voi vapaasti valita mitä laskentamenetelmiä haluaa käyttää ja mitä standardeja laskuissa hyödynnetään. Rajoittavina tekijöinä voi kuitenkin olla tarkasteltavan verkon laajuus ja käytettävän tietokoneen muisti.

4.2 Sähköverkon tehonjako

Säteittäisen verkon laskenta on verrattain yksinkertainen tehtävä, sillä teholla on säteittäisessä verkossa kulutuspisteeseen vain yksi vaihtoehtoinen reitti, jolloin on helppoa suorittaa laskelmat kullekin johto-osalle. Mallinnettavat verkot ovat kuitenkin usein silmukoituja, jolloin teholla on useita vaihtoehtoisia reittejä kuhunkin kulutuspisteeseen. Tämä vaikeuttaa verkon tehonjaon laskentaa ja laskelmat onkin suoritettava tietokoneella. (Nousiainen 2012a, s. 9-6.)

Silmukoidun verkon tehonjaon laskennassa tunnetaan lähtötietoina verkon komponenttien sijaiskytkennät ja komponenttien sähköiset arvot. Sähköverkko on rakenteeltaan symmetrinen, joten lähtökohtaisesti laskelmat voidaan suorittaa yksivaiheisten sijaiskytkentöjen avulla. Luvussa kolme on esitetty yleisimpien varavoimaverkossa esiintyvien komponenttien yksivaiheiset sijaiskytkennät. Kuormitukset pyritään jakamaan tasaisesti jokaisen vaiheen kesken, jotta verkon symmetrisyys säilyisi mahdollisimman

hyvin. Symmetrisillä komponenteilla voidaan laskea myös epäsymmetriset vikatilanteet. (Bastman 2012; Nousiainen 2012a.)

Verkon suunnittelua ja käyttöä varten on pystyttävä käsittelemään koko siirtoverkkoa kerralla. Yksittäisten komponenttien sijaiskytkennät yhdistetään koko järjestelmää kuvaavaksi laskentamalliksi, jota voidaan käsitellä verkonmallinnusohjelmistolla. NEPLAN:ssa mallinnus suoritetaan käyttämällä ohjelman komponenttikirjastoa. Kirjastosta valitaan haluttu verkon komponentti ja tämän jälkeen ohjelmalle kerrotaan komponentin sähköiset arvot. Sen jälkeen komponentit yhdistetään toisiinsa joko käyttäjän määrittelemillä johdoilla tai kiinteillä yhteyksillä, jolloin komponenttien välissä ei esiinny häviöitä. Käyttäjä näkee graafisen kaaviomallisen verkon ja ohjelma suorittaa halutut laskut käyttäen käyttäjän määrittelemiä laskentamenetelmiä. Laskujen tulokset käyttäjä näkee suoraan kaavion solmupisteiden tiedoista.

Sähköverkkojen suunnittelussa ja käyttötoiminnassa on voitava laskea verkon virtoja, jännitteitä ja tehoja sekä normaalissa kuormitustilanteessa että erilaisissa vikatilanteissa. Tehonjako ja vikavirtalaskennassa tarkastellaan vakiotaajuisia ajasta riippumattomia ilmiöitä, jotka verkon käyttäjän on tiedettävä, jotta verkkoa voidaan käyttää luotettavasti ja turvallisesti. Tehonjako ja vikavirtalaskenta ovat verkon suunnittelun ja käytön kannalta erittäin oleellisia ja niihin onkin olemassa useita erilaisia ratkaisumenetelmiä.

4.3 Tehonjaon laskenta NEPLAN:lla

Sähköverkon tehonjaon laskenta kertoo, miten sähköenergia virtaa verkon läpi kuormituksille. Tehonjako on verkostolaskennan tärkein tehtävä, se on perustana lähes kaikelle muulle verkostolaskennalle, kuten erilaisille optimoinneille sekä vikavirtojen ja stabiiliisuuden selvittämiseksi. Tehonjaon laskennan tuloksena saadaan selville yhden ajanhetken tilanne verkon komponenttien kuormittumiselle, solmupisteiden jännitteille ja kulumille sekä verkossa tapahtuville siirtohäviöille. (Bastman 2012.)

NEPLAN:ssa voi valita viidestä eri laskentamenetelmästä, miten tehonjako halutaan suorittaa. Käytettäviä menetelmiä ovat Newton-Raphson -menetelmä, laajennettu Newton-Raphson -menetelmä, virran iterointi-, jännitteenlasku- ja DC-tehonjakomenetelmä. NEPLAN:n käyttöoppaassa on kerrottu, millä perusteilla kutakin laskentamenetelmää kannattaisi käyttää.

Newton-Raphson menetelmää suositellaan käytettäväksi siirto- ja jakeluverkkojen laskennassa, joissa on epäsymmetrisiä kuormia. Laajennetussa Newton-Raphson -menetelmässä lisänä on FACTS laitteiden, shunttien ja erilaisten säätölaitteiden huomiointi. Virran iterointimenetelmää suositellaan käytettäväksi siirto- ja jakeluverkkojen tarkasteluissa, joissa on vain muutama generaattoripiste. Jännitteenlaskumenetelmää kehoitetaan käytettäväksi kiinteistöjen sähköverkoja tutkittaessa ja DC-tehonjakomenetelmää siirto- ja jakeluverkkojen laskennassa, jos tyydytään suuntaantavaan laskentatulokseen. (NEPLAN 2012.)

Porvoon jalostamon varavoimaverkko koostuu useista tuotanto- ja kulutuspisteistä, joten tehonjako kannattaa suorittaa laajennetulla Newton-Raphson -menetelmällä. Se soveltuu parhaiten monimutkaisten verkkojen laskentaan ja se huomioi tarkasti verkon eri komponentit. Nykyisillä suunnittelussa käytettävillä tehokkailla tietokoneilla, voi käyttää aina oletuksena tarkan tuloksen antavaa laajennettua Newton-Raphson -menetelmää. Sen käyttöä rajoittavaksi tekijäksi voi muodostua admittanssimatriisin tietokoneelta vaativa suuri muistin määrä. Esimerkiksi 7917 solmun verkon admittanssimatriisin talletus kokonaisuena vie muistia 1002,8 Mt. Laskennan tehokkuuden ja muistin säästön vuoksi matriisien käsittelyyn on kuitenkin kehitetty muistia säästäviä menetelmiä, jotka helpottavat laajojen, paljon nolla-alkioita sisältävien matriisien käsittelyä. (Bastman 2012.)

4.4 Silmukoidun verkon tehonjakolaskenta

Sähköverkkojen tehonjaon laskennassa tunnetaan komponenttien sähköiset arvot ja sijaiskytkennät sekä tiedetään, että tuotannon ja kulutuksen tulee olla tasapainossa. Sähköverkon tehonjakoa selvitettäessä, eri komponenteilta halutaan kuitenkin selvittää eri suureita. (Bastman 2012.)

Tehonjakolaskennan kannalta sähköverkon ajatellaan koostuvan solmupisteistä (sähköasemista) sekä niitä yhdistävistä johdoista. Tehonjaossa solmupisteet onkin jaoteltu neljään eri kategoriaan, sen mukaan, mitä suureita niistä tunnetaan ja mitä suureita niistä halutaan selvittää. Kussakin solmupisteessä on neljä suurta eli jännite U , jännitteen kulma δ , pätöteho P ja loisteho Q . Edellä mainituista suureista solmupisteissä tunnetaan aina kaksi ja kaksi lasketaan. (Bastman 2012.)

Solmupisteiden kategoria määräytyy niissä olevien komponenttien mukaan. Vertailupisteitä on kuitenkin tyypillisesti laskennassa vain yksi, ja yleensä suurimman generaattorin omaava solmupiste valitaan vertailupisteeksi. Tämän solmupisteen tehtävänä on tasata sähköntuotannon ja kulutuksen välinen ero. Sitä ei tiedetä etukäteen, koska verkon häviöitä ei tunneta tarkasti. Vertailupisteestä tunnetaan jännite ja sen kulma voidaan valita vapaasti, yleensä kulmaksi valitaan nolla astetta. Laskennassa muiden solmupisteiden jännitteiden kulmia verrataan tähän kulmaan. Alla on esitetty eri solmupistevaihtoehdot. (Bastman 2012.)

Vertailupiste (SL-bus)

Tunnetaan jännitteen itseisarvo ja -kulma (U , δ)

Lasketaan pätö- ja loisteho (P , Q)

Ei yhtään yhtälöä.

Generaattoripiste (PV-bus)

Tunnetaan generaattorin pätöteho ja napajännite (P , U)

Lasketaan loisteho ja jännitteen kulma (Q , δ)

Yksi yhtälö, josta ratkeaa jännitteen kulma solmupisteessä i δ_i

Kuormituspiste (PQ-bus)

Tunnetaan kuormituksen pätöteho ja loisteho (P, Q)

Lasketaan jännitteen itseisarvo ja -kulma (U, δ)

Kaksi yhtälö, joista ratkeaa solmupisteen i jännite U_i ja kulma δ_i

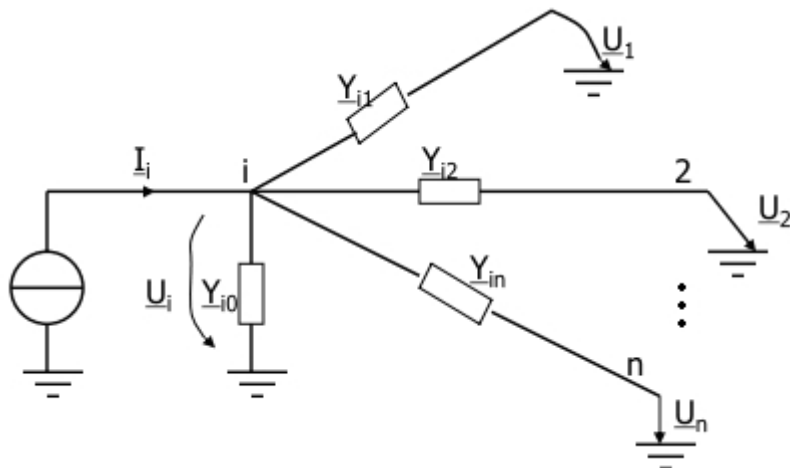
Näiden lisäksi voi olla tarpeen määritellä solmupiste, joka sisältää jännitteen säätöön kykenevän komponentin, mutta jossa ei ole generaattoria eli

Jännitesäädetty solmupiste

Tunnetaan pätöteho ja jännite ($P=0, U$)

lasketaan loisteho ja jännitteen kulma (Q, δ)

Tarkastellaan tehonjakotehtävää ensin yhden solmupisteen kannalta. Kuvassa 4.1 on esitetty miten solmupiste i kytkeytyy muihin solmupisteisiin. Virran I_i yhtälö ratkaistaan käyttäen johtojen admittansseja ja solmupisteiden jännitteitä.



Kuva 4.1. Verkon solmupisteen i kytkeytyminen muihin solmupisteisiin.

Kuvan 4.1 virralle I_i voidaan Kirchoffin virtalain mukaan kirjoittaa yhtälö (4.1)

$$\begin{aligned} I_i &= \underline{U}_i Y_{i0} + (\underline{U}_i - \underline{U}_1) Y_{i1} + (\underline{U}_i - \underline{U}_2) Y_{i2} + \dots \\ &\dots + (\underline{U}_i - \underline{U}_n) Y_{in} = \underline{U}_i Y_{i0} + \sum Y_{in} (\underline{U}_i - \underline{U}_n). \end{aligned} \quad (4.1)$$

Ryhmittelemällä yhtälö (4.1), saadaan se muotoon

$$I_i = \left(Y_{i0} + \sum Y_{in} \right) \underline{U}_i - \sum Y_{in} \underline{U}_n. \quad (4.2)$$

Vastaava yhtälö voidaan kirjoittaa jokaiselle verkon solmupisteelle. Sähköverkossa, jossa on n määrä solmupisteitä, voidaan kaikille solmupisteille saatu yhtälöryhmä yleisesti kirjoittaa yhtälön (4.3) mukaisessa matriisimuodossa:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} & \cdots & \underline{Y}_{1n} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} & \cdots & \underline{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \underline{Y}_{n1} & \underline{Y}_{n2} & \cdots & \underline{Y}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \vdots \\ \underline{U}_n \end{bmatrix} = \mathbf{I} = \mathbf{Y}\mathbf{U} \rightarrow \mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1}\mathbf{I}. \quad (4.3)$$

Matriisia \mathbf{Y} kutsutaan solmupisteadmittanssimatriisiksi ja sen alkiot muodostuvat siten, että lävistäjäalkiot \underline{Y}_{ii} koostuvat kyseisestä solmupisteestä i lähtevien admittanssien summasta. Nämä alkiot ovat nimeltään itseisadmittansseja. Muut alkiot \underline{Y}_{ij} ovat nimeltään yhteisadmittansseja ja ne ovat solmupisteiden i ja j välisiä admittansseja miinusmerkkisinä. Mikäli solmupisteiden i ja j välillä ei ole suoraa yhteyttä, on vastaava \mathbf{Y} -matriisin alkio $\underline{Y}_{ij}=0$. Isoilla verkoilla \mathbf{Y} -matriisi sisältääkin paljon nollia, koska vain harvat solmupisteet ovat yhdistetty suoraan toisiinsa johdoilla. (Bastman 2012.)

Yhtälöryhmästä (4.3) ei pystytä suoraan ratkaisemaan jännitteitä, koska verkon tuotanto ja kulutus tunnetaan tehoina eikä virtoina. Solmupisteestä i verkkoon syötetty teho voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$P_i + jQ_i = \underline{U}_i \underline{I}_i^* \Leftrightarrow P_i - jQ_i = \underline{U}_i^* \underline{I}_i, \quad (4.4)$$

missä \underline{U}_i^* on jännitteen \underline{U}_i kompleksikonjugaatti. Yhtälön (4.5) virta \underline{I}_i saadaan matriisista (4.3)

$$\underline{I}_i = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k. \quad (4.5)$$

Sijoittamalla yhtälön (4.5) virta yhtälöön (4.4), voidaan solmupisteen i teho nyt lausua muodossa

$$P_i - jQ_i = \underline{U}_i^* \cdot \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{U}_k; \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4.6)$$

Kirjoittamalla solmupisteen jännitteet kulmamuodossa, voidaan solmupisteen i teho lausua

$$P_i - jQ_i = |\underline{U}_i| \angle(-\delta_i) \cdot \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| \angle \theta_{ik} \cdot |\underline{U}_k| \angle \delta_k, \quad (4.7)$$

missä θ_{ik} on \underline{Y}_{ik} :n vaihekulma, δ_k on jännitteen \underline{U}_k :n kulma ja δ_i on jännitteen \underline{U}_i :n kulma. Yhtälö (4.7) saadaan ryhmittelemällä yhtälön (4.6) mukaiseen muotoon

$$P_i - jQ_i = |\underline{U}_i| \cdot \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| \cdot |\underline{U}_k| \angle(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i). \quad (4.8)$$

Soveltamalla Eulerin lausetta

$$e^{ix} = \cos x + j \sin x \quad (4.9)$$

yhtälöön (4.8), saadaan tehonjaossa ratkaistavat solmupisteyhtälöt pätö- ja loistehoille eriteltyä omiksi yhtälöikseen

$$P_i = |U_i| \cdot \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| \cdot |U_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.10)$$

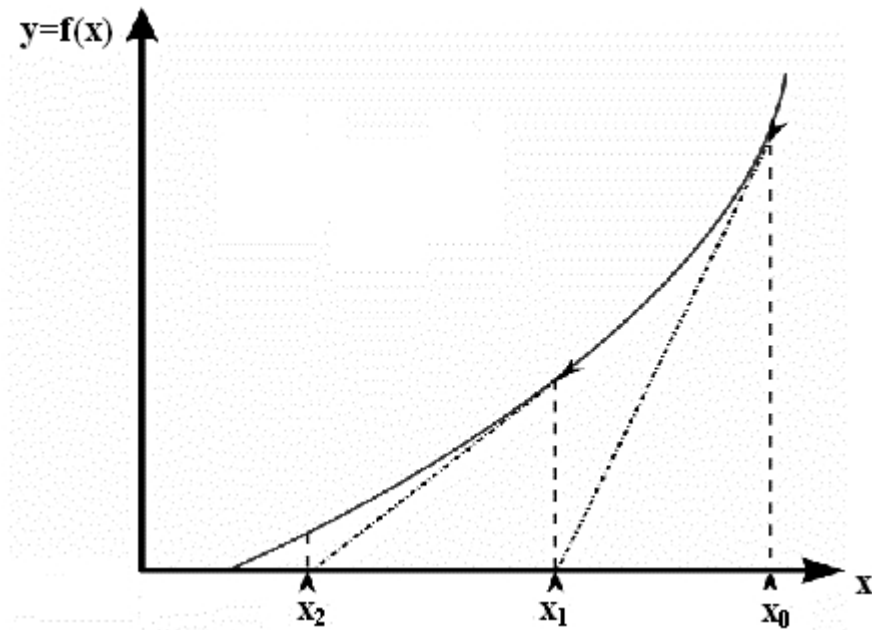
$$Q_i = -|U_i| \cdot \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| \cdot |U_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (4.11)$$

Solmupisteiden tehoyhtälöistä huomataan, että muuttujat ovat kompleksilukuja ja kyseessä on epälineaarinen yhtälöryhmä. Tehoyhtälöt ovat ratkaistavissa ainoastaan iteratiivisilla menetelmillä, kuten Gauss-Seidel tai Newton-Raphson -menetelmällä. (Bastman 2012.)

4.4.1 Newton-Raphson -menetelmä

Newton-Raphson -menetelmässä ratkaistaan yhtälön $y=f(x)$ nollakohta. Funktion nollakohdan ratkaisua on havainnollistettu kuvassa 4.2. Newtonin menetelmässä tehdään alkuarvaus mahdollisimman lähelle funktion todellista juurta, jonka jälkeen juuren approksimaatiota parannetaan korvaamalla käyrä $y=f(x)$ pisteeseen asetetulla tangentilla.

Kuvassa 4.2 x_0 on alkuarvaus. Kyseiseen pisteeseen $(x_0, f(x_0))$ asetetaan tangentti, jonka nollakohta kuvassa 4.2 on pisteessä x_1 . Pisteeseen $(x_1, f(x_1))$ asetetaan uusi tangentti, josta ratkaistaan taas nollakohta. Menetelmää jatketaan, kunnes funktion ratkaisu on saatu selville riittävällä tarkkuudella.



Kuva 4.2. Newton-Raphson -menetelmän periaate.

Tarkastellaan epälineaarista yhtälöryhmää, jonka dimensio on n

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; i=1, 2, \dots, n. \quad (4.12)$$

Oletetaan iteroinnin alkuarvauksiksi $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ ja likiarvon korjauksiksi $\Delta x_1^0, \Delta x_2^0, \dots, \Delta x_n^0$, jotka lisäämällä alkuarvauksiin saadaan yhtälön ratkaisuksi

$$f_i(x_1^0 + \Delta x_1^0, x_2^0 + \Delta x_2^0, \dots, x_n^0 + \Delta x_n^0) = 0; i=1, 2, \dots, n. \quad (4.13)$$

Kehittämällä edellä mainitut yhtälöt Taylorin sarjaksi, saadaan

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + \left[\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right)^0 \Delta x_1^0 + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right)^0 \Delta x_2^0 + \dots + \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right)^0 \Delta x_n^0 \right] + T = 0, \quad (4.14)$$

missä T on Taylorin sarjan korkeamman asteen termit. Termit $\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right)^0, \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right)^0, \dots, \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_n} \right)^0$ ovat yhtälön f_i derivaatat muuttujien x_1, x_2, \dots, x_n suhteen pisteissä $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$. (Kothari&Nagrath 2003.)

Jättämällä Taylorin sarjan korkeamman asteen termit pois, voidaan yhtälö (4.14) kirjoittaa matriisimuodossa kaikille solmupisteille

$$\begin{bmatrix} f_1^0 \\ f_2^0 \\ \vdots \\ f_n^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^0 & \cdots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^0 & \cdots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^0 & \cdots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1^0 \\ \Delta x_2^0 \\ \vdots \\ \Delta x_n^0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

tai vektorimatriisimuodossa

$$\mathbf{f}^0 + \mathbf{J}^0 \Delta \mathbf{x}^0 \approx 0. \quad (4.16)$$

\mathbf{J}^0 tunnetaan Jacobin matriisina. Siinä on derivaatat kaikista funktioista kaikkien tuntemattomien suhteen. Yhtälö (4.16) voidaan kirjoittaa muotoon

$$\mathbf{f}^0 \approx [-\mathbf{J}^0] \Delta \mathbf{x}^0. \quad (4.17)$$

Korjaustermien likiarvot $\Delta \mathbf{x}^0$ voidaan ratkaista yhtälöstä (4.17). Saadut korjaustermit summataan alkuarvauksiin

$$\mathbf{x}^1 = \mathbf{x}^0 + \Delta \mathbf{x}^0 \quad (4.18)$$

tai yleisesti iterointikierrokselle $r+1$

$$\mathbf{x}^{r+1} = \mathbf{x}^r + \Delta \mathbf{x}^r. \quad (4.19)$$

Iterointia jatketaan, kunnes haluttu laskentatarkkuus saavutetaan, eli yhtälö (4.20)

$$|f_i(x^r)| < \varepsilon; i=1, 2, \dots, n \quad (4.20)$$

on saatu laskettua riittävän tarkasti. Yhtälössä (4.20) ε on haluttu tarkkuus. (Kothari&Nagrath 2003.)

4.4.2 Newton-Raphson -menetelmä sähköverkkojen tehonjaossa

Newton-Raphson -menetelmää sovelletaan sähköverkkojen tehonjaon laskennassa seuraavasti:

1) Arvataan solmupisteiden jännitteille ja kulmille alkuarvot, jos edeltävän laskennan tuloksia ei ole käytettävissä. Asetetaan jännitteen arvoksi yksi ja kulman arvoksi nolla. Tätä kutsutaan flat-start aloitukseksi.

2) Lasketaan solmupisteiden pätö- ja loistehot yhtälöistä (4.10) ja (4.11).

3) Lasketaan tehotasapainoyhtälöillä solmupisteiden todellisten tehojen ja edellisessä kohdassa laskettujen tehojen erotukset verkon jokaiselle kuormitus- ja generaattoripisteelle:

$$\Delta P_i = P_{i,todellinen} - P_{i,laskettu} \quad (4.21)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,todellinen} - Q_{i,laskettu} \quad (4.22)$$

joissa $P_{i,todellinen}$ ja $Q_{i,todellinen}$ ovat solmupisteessä tuotettujen tehojen todelliset arvot ja $P_{i,laskettu}$ ja $Q_{i,laskettu}$ ovat solmupisteiden tehojen 2) -kohdassa lasketut arvot. Generaattoripisteissä loistehon suuruutta ei etukäteen tiedetä, joten näissä pisteissä lasketaan ainoastaan pätötehojen erotus yhtälön (4.21) mukaisesti.

4) Muodostetaan Jacobin matriisi arvoilla U_m ja δ_m .

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_i}{\partial |U_m|} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial |U_m|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_m \\ \Delta |U_m| \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

jossa alaindeksi i viittaa matriisiin (4.17) riviin ja alaindeksi m matriisiin (4.17) sarakkeeseen. Matriisin (4.23) alkiot ΔP_i ja ΔQ_i ovat yhtälöissä (4.21) ja (4.22) laskettujen solmupisteen i pätö- ja loistehojen erotukset. Alkiot $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m}$, $\frac{\partial P_i}{\partial |U_m|}$, $\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m}$ ja $\frac{\partial Q_i}{\partial |U_m|}$ ovat Jacobin matriisin osittaisderivaattoja kulman δ_m ja jännitteen U_m suhteen. Alkiot $\Delta \delta_m$ sekä ΔU_m ovat korjaukset solmupisteen i kulmalle ja jännitteelle.

5) Ratkaistaan matriisiyhtälöstä (4.23) korjaukset solmupisteiden jännitteille ja kulmille.

6) Korjataan kulma δ_i ja jännite U_i yhtälöiden (4.24) ja (4.25) mukaisesti

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \Delta \delta_i \quad (4.24)$$

$$|U_{i+1}| = |U_i| + \Delta |U_i|. \quad (4.25)$$

Sitten palataan kohtaan 2).

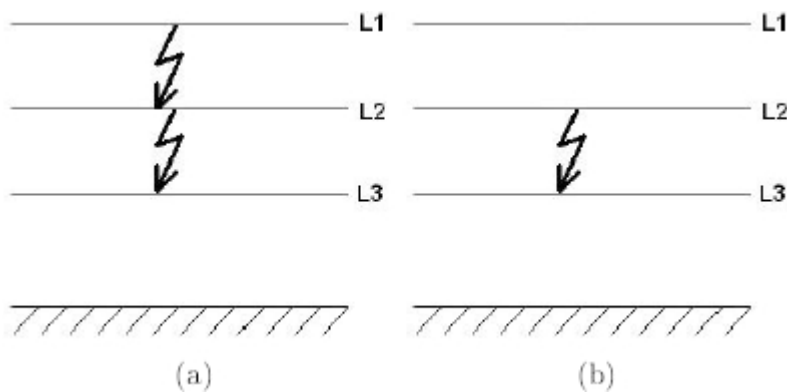
Laskentaa jatketaan, kunnes kohdassa 3) tehojen korjaustermien ΔP_i ja ΔQ_i suuruudet ovat riittävän pienet jokaisen solmupisteen osalta. Tuloksena saadaan tehot, jännite ja jännitteen kulma jokaiselle verkon solmupisteelle. (Bastman 2012.)

4.5 Sähköverkon viat

Sähköverkoissa esiintyy vikatapauksia, kuten oiko- ja maasulkuja sekä maasulullisia ja maasuluttomia johdinkatkeamia. Kolmivaiheiset oikosulut ovat symmetrisiä vikoja ja muut viat ovat epäsymmetrisiä. Symmetrisessä viassa kaikkien vaiheiden jännitteet ja virrat ovat yhtä suuret. Epäsymmetrisessä viassa vaiheiden virrat ja jännitteet eivät käytäydy symmetrisesti, mutta niitä voidaan käsitellä symmetristen komponenttien avulla, jolloin laskenta yksinkertaistuu. Symmetrisiin komponentteihin perehdytään tarkemmin luvussa 4.8. (Nousiainen 2012a; Bastman 2012.)

Vikavirtalaskennan avulla voidaan määrittää katkaisijoiden ja kytkinlaitteiden vikavirran katkaisu- ja kytkentäkyky sekä verkostokomponenttien ja johtojen vikavirtakes- toisuus. Vikavirtalaskennasta saadaan myös maksimi- ja minimivikavirrat ja näin ollen voidaan määrittää suojalaitteiden tyypit, sijainnit ja asettelut. (Bastman 2012.)

Sähköverkon komponenteille suurimmat rasitukset aiheuttava vika on kolmivaihei- nen oikosulku. Oikosulkuvirrat voivat saavuttaa nimellisvirtaan verrattuna 30...40 -kertaisia arvoja. Varavoimaverkoissa oikosulkuvirrat eivät tosin saavuta yhtä suuria arvoja, sillä dieselgeneraattoreiden syöttämä oikosulkuvirta ei ole yhtä suuri kuin valtakunnan verkosta saatava oikosulkuvirta. Oikosulut aiheuttavat laitteiden ja johtojen ylikuumenemisen lisäksi mekaanisia rasituksia suurten virtojen aiheuttamien oikosulku- voimien vuoksi. Kuvassa 4.3 on havainnollistettu kolmi- ja kaksivaiheiset oikosulut. (Nousiainen 2012a.)

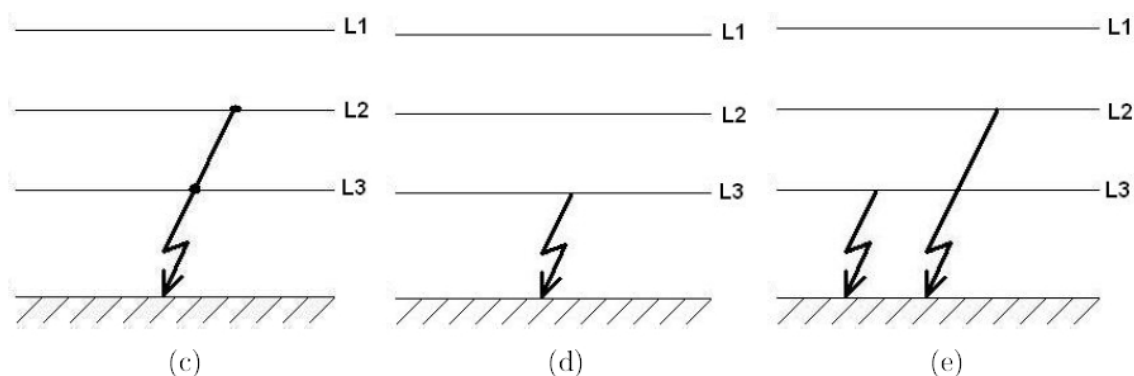


Kuva 4.3. (a) kolmivaiheinen oikosulku, (b) kaksivaiheinen oikosulku.

Oikosulut ovat aina vaiheiden välisiä. Oikosuluksi kutsutaan sitä, kun verkon virta- piiri sulkeutuu vikaimpedanssin tai valokaaren kautta. Eristysvika tai esimerkiksi ulkoi- nen kosketus voi aiheuttaa oikosulun.

Maasulussa syntyvien ylijännitteiden suuruus riippuu verkon tähtipisteen maadoitus- tavasta. Verkot voidaan jakaa maadoitustavan perusteella maasta erotettuihin, sammu- tettuihin ja tehollisesti maadoitettuihin verkkoihin. Porvoon jalostamon varavoimaverk- ko on maadoitettu verkko, joten tarkastellaan siinä tapahtuvia ilmiöitä tarkemmin. (Nousiainen 2012a.)

Maadoitetussa verkossa muuntajan tähtipiste on yhdistetty maahan suoraan tai hyvin pienen impedanssin kautta. Suomessa pienjänniteverkot ovat turvallisuussyistä maadoitettuja. Hyvällä maadoituksella turvataan se, että vikatilanteessa syntyy suuri maasulkuvirta, joka laukaisee nopeasti suojalaitteen ja katkaisee jännitteen. Maadoitetussa verkossa maasulun aikana terveiden vaiheiden jännitteet eivät nouse yhtä paljon kuin verkoissa, joissa maan ja verkon tähtipisteen välissä on suuri impedanssi. Kuvassa 4.4 on esitetty yksi- ja kaksivaiheinen maasulku sekä kaksoismaasulku. (Nousiainen 2012a; Bastman 2012.)



Kuva 4.4. (c) kaksivaiheinen maasulku, (d) yksivaiheinen maasulku ja (e) kaksoismaasulku.

Maasulullisissa johdinkatkeamissa johdin katkeaa ja jännitteinen pää ylettyy maahan asti aiheuttaen maakosketuksen. Jalostamon olosuhteissa, kun kaapelit kulkevat maan alla, kaapelin katkeaminen aiheuttaa lähes poikkeuksetta maasulullisen johdinkatkeaman. Maasuluttomissa johdinkatkeamissa johdin katkeaa, mutta johtimen pää ei osu maahan. Johdinkatkeamat ovat kaapeleilla harvinaisia, ne aiheutuvat pääosin kaivinkoneiden kaivuutöistä. (Nousiainen 2012a.)

Kaapeleissa voi kuitenkin ilmetä katkeileva maasulku, jossa kaapeliin tulee eristysvika ja näin ollen kaapelin johtimet pääsevät kosketuksiin toistensa tai maan kanssa. Eristyksen pettäessä, kaapelin johtimiin pääsee vettä ja syntyy läpilyönti, joka aiheuttaa maasulun. Maasulku poistuu veden haihtuessa läpilyönnin aiheuttaman lämmön johdosta. Maasulku syntyy jälleen, kun kaapeliin kertyy vettä ja näin maasulku syntyy ja poistuu.

4.6 Vikavirtojen laskeminen NEPLAN:lla

Eri standardeissa määritellään, millä jännite- ja impedanssiarvoilla kussakin vikatilanteessa vikavirrat lasketaan. NEPLAN:ssa on valittavissa sekä IEC että ANSI standardit vikavirtojen laskemiseen. ANSI standardeja käytetään pääsääntöisesti Yhdysvalloissa ja Suomeen NEPLAN:lla suoritettavat vikavirtalaskut pohjautuvatkin vuonna 2001 julkaistuun IEC 60909-0 "Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents" -standardiin.

NEPLAN:ssa sähköverkkojen käyttäytyminen oikosulkujen aikana mallinnetaan vikasolmupisteessä vikaa edeltävän jännitteen sekä myötä-, vasta- ja nollaverkon impedanssien avulla. Syöttävät elementit, kuten generaattorit ja epätahtikoneet, mallinnetaan impedanssin ja jännitelähteen kytkentänä. (NEPLAN 2012.)

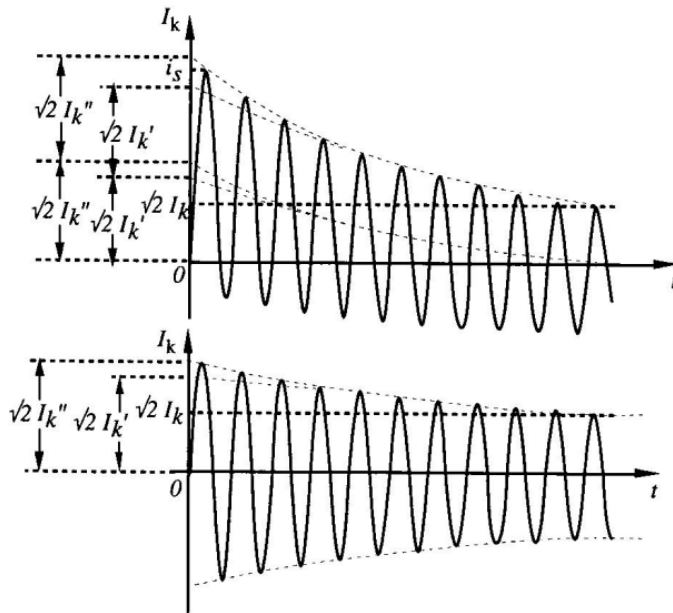
Oletettaessa sähköverkon olevan symmetrinen kaikkien vaiheiden kesken, vikaehdot määräävät miten komponenttiverkot kytkeytyvät toisiinsa. Vikaa edeltävä solmupisteen jännite lasketaan aikaisemmin esitellyn solmupisteadmittanssimatriisin avulla $U = Y^{-1} \cdot I_e$, missä I_e on syöttävän elementin virta. (NEPLAN 2012.)

NEPLAN:ssa vikavirtojen laskenta perustuu myötä-, vasta- ja nollaverkon hyödynämiseen. Sähköverkkoa luotaessa, käyttäjän pitääkin määritellä jokaisen komponentin sähköiset arvot jokaiselle verkolle erikseen. Laskettaessa kolmivaiheista oikosulkua, tarvitaan ainoastaan myötäverkon tiedot, mutta jokaisessa muussa viassa tarvitaan sekä vasta- että nollaverkon tiedot. Symmetristen ja epäsymmetristen vikojen analysointiin on perehdytty seuraavissa kappaleissa. (NEPLAN 2012.)

4.7 Symmetristen vikojen analysointi

Kolmivaiheista oikosulkua syöttää normaalitilassa normaali symmetrinen kolmivaihejännite. Oikosulkutapahtuman alkuhetkestä riippuen, oikosulkuvirta voi olla joko symmetrinen tai epäsymmetrinen. Oikosulkuvirta on symmetrinen, jos oikosulku tapahtuu jännitteen ollessa huippuarvossaan, muussa tapauksessa oikosulkuvirta on epäsymmetrinen. Eri vaiheiden jännitteet saavuttavat huippuarvonsa eri ajanhetkinä, jolloin eri vaiheiden oikosulun aikaiset virrat muodostuvat erilaisiksi. (Nousiainen 2012a, s. 9-11.)

Heti oikosulkuvian syntymisen jälkeen hetkellisiin vikavirran arvoihin vaikuttaa vian syntyhetkellä vaikuttanut jännitteen hetkellisarvo sekä pyörivien koneiden aluksi pieni impedanssi. Epäsymmetrisen oikosulkuvirran ensimmäistä oikosulkuhetken jälkeistä huippuarvoa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi i_s . Tämä on suurin oikosulussa esiintyvä virran arvo ja se määrää kojeille ja laitteille aiheutuvat suurimmat mekaaniset rasitukset ja sitä käytetäänkin mekaanisen mitoituksen perusteena. Epäsymmetrisissä oikosuluissa esiintyy myös tasavirtakomponenttia, joka kuitenkin vaimenee ensimmäisten jaksojen aikana. Kuva 4.5 osoittaa miten oikosulkuvirran I_k amplitudi vaimenee vähitellen ajan kuluessa oikosulun tapahtumahetkestä eteenpäin. (Nousiainen 2012a, s. 9-11.)



Kuva 4.5. Yllä epäsymmetrinen ja alla symmetrinen oikosulkuvirta tahtikoneen läheisyydessä (Nousiainen 2012a, s. 9-11.).

Oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti vaimenee, erityisesti oikosulun tapahtuessa verkon pyörivien koneiden läheisyydessä. Tämä johtuu pyörivien koneiden käämitykseen indusoituvista virroista, jotka hidastavat koneiden käämivoiden muutoksia. (Nousiainen 2012a, s. 9-11.)

Oikosulku voidaan jakaa kolmeen eri tilaan oikosulun vaiheen mukaan. Laskettaessa alkutilan oikosulkuvirtaa I_k'' , pitää huomioida tahtikoneen pitkittäinen alkureaktanssi X_d'' . Muutostilan oikosulkuvirran I_k' mallinnuksessa pitää huomioida tahtikoneen pitkittäinen muutosreaktanssi X_d' ja pysyvän tilan oikosulkuvirtaa I_k laskettaessa pitää huomioida tahtikoneen pitkittäinen tahtireaktanssi X_d . Oikosulun alkuhetkenä tahtikoneiden mallinnuksessa käytetty tahtireaktanssi on pieni ja se suurenee muutostilan tahtireaktanssin kautta kohti jatkuvan tilan tahtireaktanssia. Oikosulkuvirran amplitudin vaimeneminen johtuu juuri tahtikoneen tahtireaktanssin suurenemisesta. Mitä kauemmaksi tahtikoneesta oikosulku tapahtuu, sitä vähäisemmäksi käy tahtikoneen muuttuvien reaktanssien vaikutus. (Nousiainen 2012a; Bastman 2012.)

Oikosulkuvirran suurin hetkellisarvo esiintyy yhden puolijakson kuluttua oikosulun alkuhetkestä ja se on suuruudeltaan $2\sqrt{2}I_k''$, kuten kuvaan 4.5 on merkitty. Syäsoikosulkuvirta jää käytännössä tätä teoreettista arvoa hiukan pienemmäksi ja mitoituksen perustana NEPLAN:ssa käytetäänkin IEC60909:n määrittelemää arvoa

$$i_s \approx \kappa \cdot \sqrt{2}I_k'', \quad (4.26)$$

jossa $\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X}$. (Nousiainen 2012a, NEPLAN 2012.)

Oikosulkukohdassa esiintyvä oikosulkuvirta I_k voidaan arvioida Theveninin menetelmän perusteella. Theveninin menetelmässä verkko mallinnetaan ekvivalenttisella vikapaikasta näkyvällä impedanssillaan, jolloin vikavirraksi saadaan

$$\underline{I}_k = \frac{\underline{U}^0}{\underline{Z}_{th} + \underline{Z}_f}, \quad (4.27)$$

missä \underline{I}_k on vikavirta, \underline{U}^0 on jännite vikapaikassa, \underline{Z}_{th} on Theveninin impedanssi vikapaikassa ja \underline{Z}_f on vikapaikan vikaimpedanssi. (Bastman 2012.)

Yhtälössä (4.27) käytetty Theveninin impedanssi vikapaikassa \underline{Z}_{th} voidaan ratkaista impedanssimatriisista \underline{Z} , jonka muodostus voidaan tehdä usealla eri tavalla. Yksi muodostustapa on kääntää kappaleessa 4.4 esitelty solmupisteadmittanssimatriisi (4.3) impedanssimatriisiksi $\underline{Z} = \underline{Y}^{-1}$. Solmupisteadmittanssimatriisin kääntäminen on tyypillisesti laskennallisesti raskas operaatio, mutta esimerkiksi jalostamon varavoimaverkon solmupisteadmittanssimatriisin kääntäminen ei tuota laskennallisia ongelmia. (Bastman 2012.)

Vikapaikasta r näkyvä Theveninin impedanssi on impedanssimatriisin lävistäjäalkio \underline{Z}_{rr} . Vikavirta voidaan laskea Theveninin menetelmällä, kun yhtälöön (4.27) sijoitetaan \underline{Z}_{th} paikalle vastaavan solmupisteen impedanssimatriisin lävistäjäalkio \underline{Z}_{rr} .

4.8 Symmetriset komponentit

Symmetristen vikojen laskenta on helpompaa kuin epäsymmetristen vikojen laskenta. Vain pieni osa vioista on kuitenkin symmetrisiä. Epäsymmetristen vikojen laskentaan onkin kehitetty malli, jossa vaihevirtoja kuvataan niin sanottujen symmetristen komponenttien avulla. Siinä kunkin vaiheen virran kuvitellaan koostuvan kolmesta eri osavirrasta; myötaverkon, vastaverkon ja nollaverkon virrasta.

Kunkin vaihevirran osakomponentti kohtaa sähköverkossa kulkiessaan omat myötä-, vasta- ja nollaverkon impedanssinsa. Nämä kuvitteelliset osajärjestelmät ovat lineaarisia ja kokonaisvaihevirta saadaan superpositioperiaatteella, eli summaamalla virtojen osakomponentit yhteen. Symmetrisiä komponentteja hyödyntämällä epäsymmetriset viat voidaan käsitellä symmetrisesti ja laskenta helpottuu. Menetelmää sovelletaan ja tarvitaan erityisesti siirtoverkoilla. Keski- ja pienjänniteverkoissa vikatilanteiden käsittely onnistuu usein yksinkertaisemmilla yhtälöillä. NEPLAN:ssa kuitenkin vikavirran laskenta perustuu kaikissa tapauksissa symmetristen komponenttien hyödyntämiseen. (Kothari&Nagrath 2003; Nousiainen 2012a; NEPLAN 2012.)

Symmetrisiä järjestelmiä kutsutaan myötä-, vasta- ja nollajärjestelmäksi, ja niitä merkitään vastaavasti alaindekseillä 1, 2 ja 0. Myötäjärjestelmän vaihejärjestys on a-b-c, vastajärjestelmän vaihejärjestys on a-c-b ja nollajärjestelmässä kaikki vaihesuureet ovat yhtä suuria sekä samanvaiheisia. (Bastman 2012.)

Vaihejännitteet koostuvat symmetrisistä komponenteista vastaavalla lailla kuin vaihevirratt. Myötäjärjestelmässä vallitsee normaali vaihejärjestys a-b-c. Kun vaihe-eroa merkitään symbolilla $\underline{\alpha} = 1\angle 120^\circ$, voidaan myötäjärjestelmän jännitteet merkitä

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{a1} &= \underline{U}_1 \\
 \underline{U}_{b1} &= \underline{\alpha}^2 \underline{U}_1 \\
 \underline{U}_{c1} &= \underline{\alpha} \underline{U}_1
 \end{aligned}
 \tag{4.28}$$

Vastajärjestelmässä vaihejärjestys on vastakkainen myötäjärjestelmään nähden eli a-c-b ja näin jännitteet merkitään

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{a2} &= \underline{U}_2 \\
 \underline{U}_{b2} &= \underline{\alpha} \underline{U}_2 \\
 \underline{U}_{c2} &= \underline{\alpha}^2 \underline{U}_2
 \end{aligned}
 \tag{4.29}$$

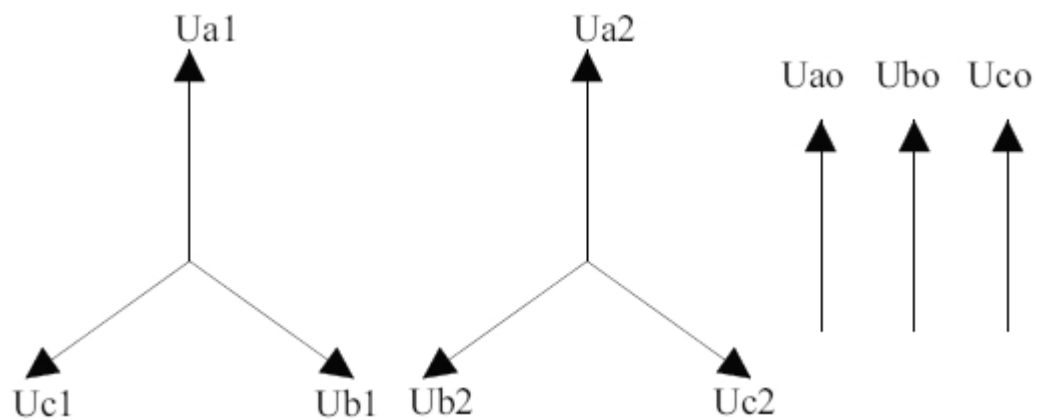
Nollajärjestelmässä komponentit ovat samanvaiheisia ja samansuuruisia. Nollajärjestelmän jännitteet ovat

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{a0} &= \underline{U}_0 \\
 \underline{U}_{b0} &= \underline{U}_0 \\
 \underline{U}_{c0} &= \underline{U}_0
 \end{aligned}
 \tag{4.30}$$

Todelliset vaihejännitteiden arvot saadaan laskemalla myötä-, vasta- ja nollakomponenttien arvot yhteen

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_a &= \underline{U}_{a0} + \underline{U}_{a1} + \underline{U}_{a2} \\
 \underline{U}_b &= \underline{U}_{b0} + \underline{U}_{b1} + \underline{U}_{b2} \\
 \underline{U}_c &= \underline{U}_{c0} + \underline{U}_{c1} + \underline{U}_{c2}
 \end{aligned}
 \tag{4.31}$$

Kuvassa 4.6 on esitetty symmetriset komponentit vektorimuodossa. (Nousiainen 2012a, s. 12-2.)



Kuva 4.6. Symmetriset komponentit: myötä-, vasta- ja nollajärjestelmä (Nousiainen 2012a, s. 12-3.).

Yhtälöt (4.31) voidaan ilmaista yhtälöiden (4.28), (4.29) ja (4.30) mukaisesti myös matriisiyhtälönä.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{\alpha}^2 & \underline{\alpha} \\ 1 & \underline{\alpha} & \underline{\alpha}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.32)$$

Yhtälöstä (4.32) voidaan kääntäen ratkaista epäsymmetrisiä jännitteitä \underline{U}_a , \underline{U}_b ja \underline{U}_c vastaavat symmetriset komponentit \underline{U}_0 , \underline{U}_1 ja \underline{U}_2

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{\alpha}^2 & \underline{\alpha} \\ 1 & \underline{\alpha} & \underline{\alpha}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

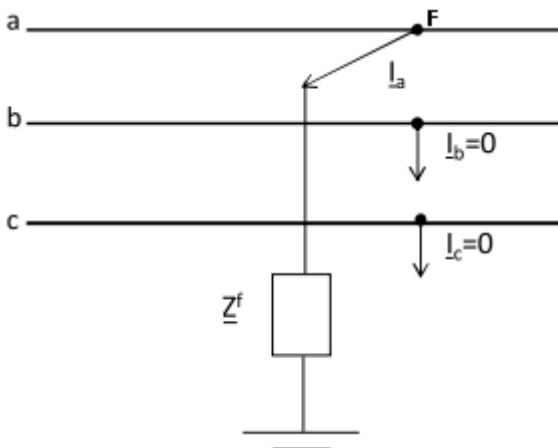
ja näin päästään laskemaan epäsymmetrisiä vikatilanteita ikään kuin ne olisivat symmetrisiä. Vastaavat muunnosyhtälöt voidaan tehdä virroille. (Kothari&Nagrath 2003; Nousiainen 2012a.)

4.9 Epäsymmetristen vikojen analysointi

Yksi- ja kaksivaiheisen maasulun, kaksivaiheisen oikosulun ja erikoisvikojen laskennassa hyödynnetään symmetrisiä komponentteja. NEPLAN:n manuaalissa on esitelty vikatapausten laskennassa käytetyt yhtälöt.

Epäsymmetristen vikojen laskennassa yhtälöt perustuvat komponenttiverkkoihin. Niiden kytkennästä saadaan yhtälöt vikavirtojen laskemiseen. Tarkastellaan seuraavaksi, miten yksivaiheisen maasulun laskenta onnistuu symmetrisillä komponenteilla. (NEPLAN 2012.)

Yksivaiheisen maasulun laskennan selkeyttämiseksi pitää tarkastella yksivaiheisen maasulun komponenttiverkkojen kytkentää. Kuvassa 4.7 on esitetty, miten a-vaihe sulkeutuu vikaimpedanssin \underline{Z}^f kautta maahan.



Kuva 4.7. Yksivaiheinen maasulku pisteessä F.

Tarkasteltaessa vikapisteessä F tapahtuvaa maasulkua, laskennan selkeyttämiseksi tehdään joitain oletuksia

$$\begin{aligned} I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \\ V_a &= Z^f I_a \end{aligned} \quad (4.34)$$

Symmetriset komponentit vikavirroille ovat tällöin, kun I_b ja I_c ovat nolla ja vaihe-eroa merkitään symbolilla $\underline{\alpha} = 1 \angle 120^\circ$.

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{a2} \\ I_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.35)$$

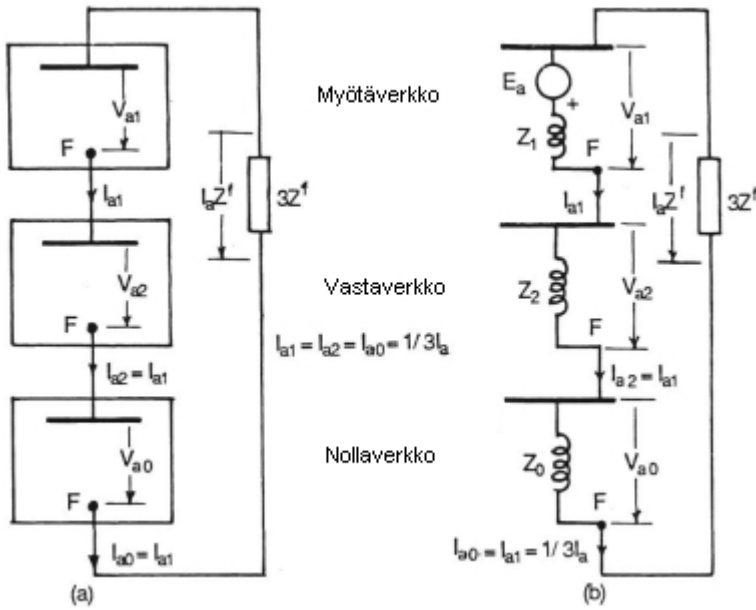
eli a-vaiheen myötä-, vasta- ja nollaverkon virroille pätee

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a. \quad (4.36)$$

Esittämällä yhtälön (4.34) jännite V_a symmetristen komponenttien avulla, saadaan

$$V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = Z^f I_a = 3Z^f I_{a1}. \quad (4.37)$$

Yhtälöiden (4.36) ja (4.37) perusteella yksivaiheisessa maasulussa komponenttiverkkojen sarjakytkennäksi saadaan kuvan 4.8 mukainen verkko. Edellä mainituista yhtälöistä huomataan, että kaikki osavirrat ovat samansuuruisia ja osajännitteiden summaksi saadaan $3Z^f I_{a1}$. Symmetrisiä verkoja luodessa pitää muistaa, että lähdejännite E_a tulee ainoastaan myötäverkkoon, kuten kuvassa 4.8 (b) on tehty. Lähdejännite kuvaa vikapisteessä F ennen vikaa ollutta jännitettä.



Kuva 4.8. Komponenttiverkkojen kytkentä yksivaiheisessa maasulussa (Kothari&Nagrath 2003, s. 400.).

Kuvassa 4.8 myötä-, vasta- ja nollaverkko on kytkeytynyt toisiinsa vikapaikasta F. Käyttämällä Theveninin ekvivalenttia kuvan 4.8 (b) komponenttiverkkoon, voidaan myötäverkon virta laskea

$$I_{a1} = \frac{E_a}{(Z_1 + Z_2 + Z_0) + 3Z^f} = I_{a2} = I_{a0}. \quad (4.38)$$

NEPLAN:n manuaalissa yksivaiheisen maasulun virrat myötä-, vasta- ja nollaverkolle lasketaan kaavan (4.39) mukaisesti

$$I''_{k1} = \frac{V_k^0}{Z_{k1} + Z_{k2} + Z_{k0}} = I''_{k2} = I''_{k0}, \quad (4.39)$$

missä alaindeksi 1 viittaa myötäjärjestelmään, 2 viittaa vastajärjestelmään ja 0 viittaa nollajärjestelmään. Z_k on viallisen solmupisteen impedanssi ja V_k^0 on viallisen solmupisteen jännite ennen vikaa.

Yhtälö (4.38) on sama kuin NEPLAN:n manuaalissa esitetty yhtälö sillä erotuksella, että NEPLAN:n yhtälössä maasulun impedanssin Z^f on oletettu olevan nolla, jolloin se on jätetty huomioimatta. NEPLAN:n vikavirtayhtälössä Theveninin ekvivalentin lähdējännitettä oli merkitty V_k^0 . (Kothari&Nagrath 2003; Bastman 2012.)

Eri vikatapauksissa komponenttiverkot kytkeytyvät eri tavoilla toisiinsa ja näin ollen Theveninin ekvivalentit vikapaikasta nähtynä vaihtelevat ja vikavirtayhtälöille saadaan erilaisia yhtälöitä. Yksivaiheisessa maasulussa myötä-, vasta-, ja nollaverkon virrat olivat yhtä suuret. Näin ei kuitenkaan ole muissa tapauksissa, vaan jokaisen osaverkon virralle saadaan erilaiset yhtälöt. Yhtälöt muodostetaan kuitenkin samaan tapaan kuin yksivaiheisen maasulun esimerkissä.

5 VARAVOIMAVERKON MALLINNUS JA VERKOSSA HAVAITUT PUUTTEET

5.1 Varavoimaverkon käyttötapa

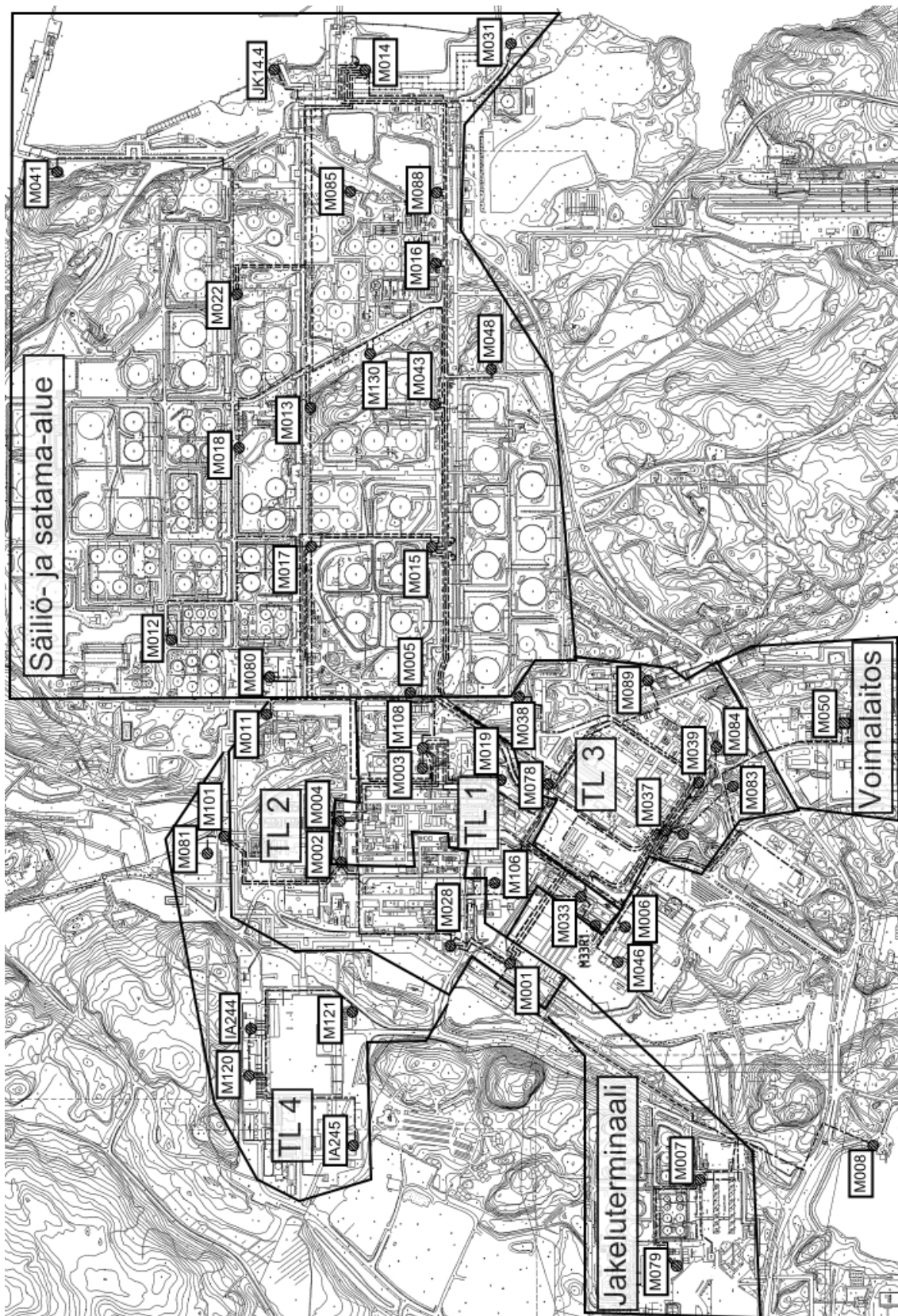
Porvoon jalostamon varavoimaverkkoon kytkettyjä laitteita syötetään varavoimaverkkoon liitettyjen muuntamoiden 100H-keskuksilta. 100H-keskusten syöttö tulee puolestaan normaalitilanteissa muuntamoiden 100F-keskuksilta, jotka ovat muuntajien välityksellä yhteydessä valtakunnan verkkoon. Kun 100H-keskuksen jännite laskee alle 70 %:iin nimellisarvosta, siihen kytketty varavoimageneraattori käynnistyy. Mikäli 100H-keskuksen kiskoon palautuu jännite, esimerkiksi syötönvaihdon tai oikosulun nopean poiskytkennän jälkeen, ei dieselgeneraattoria synkronoida verkkoon, vaan se jää varokäynnille. (Juusti 2012.)

Mikäli 100H-keskuksen kiskon jännite pysyy alle 70 %:ssa nimellisarvosta, normaalisyötön katkaisija avataan ja generaattorikatkaisija ohjataan kiinni syöttämään 100H-keskusta. Generaattorin katkaisija voidaan ohjata kiinni, kun generaattori on saavuttanut nimellisen pyörimisnopeuden ja nimellisjännite on saavutettu. Tähän kuluu aikaa noin neljä sekuntia. Muuntamoissa, joissa ei ole varavoimageneraattoria, 100H-keskuksen ollessa jännitteetön ennalta määritellyn ajan, normaalisyöttö F-keskukselta avataan ja varavoimakatkaisija ohjataan kiinni syöttämään 100H-keskusta. (Juusti 2012.)

Varavoimaverkon generaattorit eivät ole rinnankäytössä muiden generaattoreiden kanssa, kun niillä syötetään varavoimaverkon kuormia. Jokaisen generaattorin jakelualue on pyritty määrittämään siten, että ne jaksavat syöttää oman saarekkeen tehotarpeen. Koekäyttötilanteessa generaattorit toimivat kuitenkin rinnankäytössä sähköjake-luverkon kanssa. (Juusti 2012.)

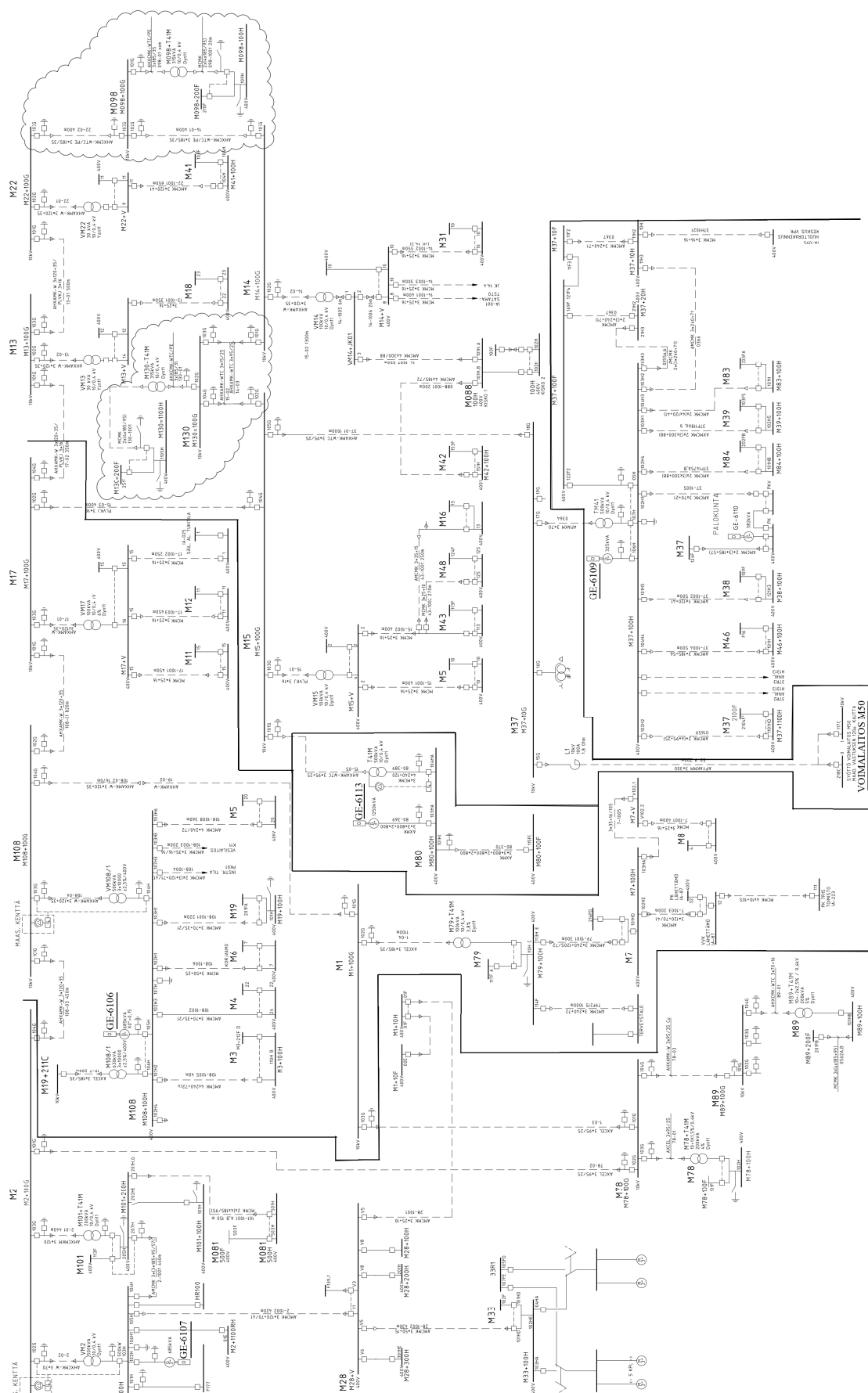
Porvoon jalostamon varavoimaverkko koostuu yhteensä yhdeksästä eri saarekkeesta. Generaattoreiden syöttämien jakelualueiden laajuutta voidaan kuitenkin muuttaa eri kytkentätilanteilla. Pääsääntöisesti varavoimaverkon kytkimet on aseteltu siten, että häiriön tapahtuessa ainoastaan generaattorikatkaisijat pitää kytkeä kiinni ja yhteydet muuntamoiden 100F-keskuksiin pitää avata.

Kuvassa 5.1 on esitetty Porvoon jalostamon varavoimakartta, johon on merkitty varavoimaverkkoon liitetty muuntamot sekä jalostamon eri alueet ja kuvassa 5.2 on esitetty jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimajakelukaavio. Kuvasta 5.2 selviää, minkä generaattorin varavoimasaarekkeeseen jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkon muuntamot on kytketty.



Kuva 5.1. Porvoon jalostamon jalostamoalueen varavoimakartta.

Kuvaan 5.2 on rajattu generaattoreiden GE-6106, GE-6107, GE-6109 ja GE-6113 sekä voimalaitoksen varavoimajakelualueet.



Kuva 5.2. Jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimajakelukaavio.

5.2 Varavoimaverkon komponenttien mallinnus

Porvoon jalostamon varavoimaverkkoa on rakennettu monella eri vuosikymmenellä ja varsinkin verkon vanhimpien komponenttien tiedot olivat puutteellisia. Varavoimaverkon generaattoreista, muuntajista ja moottoreista oli kuitenkin tiedossa nimellistehot ja nimellisjännitteet, joiden avulla voitiin selvittää komponenttien sähköisiä arvoja NEPLAN:n mallia varten. Mikäli jostain verkon komponentista ei ollut tiedossa mallinnuksessa tarvittavia tietoja, komponentti mallinnettiin vastaavanlaisen laitteen nykypäivän tiedoilla.

Suurin osa Porvoon jalostamon varavoimaverkon dieselgeneraattoreista on AGCO Sisu Powerin valmistamia. Generaattoreista ei ollut saatavilla kaikkia mallinnukseen tarvittavia tietoja, joten generaattoreiden tiedot katsottiin AGCO Sisu Power:n markkinoilla olevista generaattoreista. Vaikka Porvoon jalostamolla olevat generaattorit ovat vanhoja, vastaavat ne silti sähköisiltä ominaisuuksiltaan suurilta osin nykypäivän generaattoreita. (Pulakka 2012).

Porvoon varavoimaverkon jakelumuuntajista oli tiedossa nimellisjännitteet, nimellistehot ja kytkennät. NEPLAN:n mallinnuksessa tarvittiin kuitenkin paljon muitakin tietoja. Tiedot katsottiin ABB:n KTMU 24 NC -sarjan jakelumuuntajista, jotka vastaavat sähköisiltä arvoiltaan suurelta osin varavoimaverkkoon kytkettyjä muuntajia. Varavoimaverkkoon kytkettyjen moottoreiden mallinnuksessa puolestaan hyödynnettiin ABB:n M3BP-sarjan prosessivalurautamoottoreiden tietoja. Porvoon jalostamolla suurin osa moottoreista on ABB:n valmistamia, joten moottoreiden mallinnuksessa käytetyt sähköiset arvot ovat erittäin lähellä moottoreiden todellisia arvoja.

Moottoreiden lisäksi varavoimaverkkoon on kytketty paljon muutakin kuormaa. Eri muuntamoiden kuormien mallinnuksessa pyrittiin mallintamaan nimellisteholtaan yksittäiset suuret kuormat, kuten moottorit, UPS-järjestelmien akkujen syötöt ja tukitilojen kuormat. Loput kuormat, kuten lamput ja muut nimellisteholtaan pienet laitteet, summattiin yhteen ja ne mallinnettiin yhtenä vakiokuormana, jonka tehokertoimena käytettiin 0,98:aa. Johtojen mallinnuksessa hyödynnettiin Pasi Puttoselta saatua komponenttikirjastoa, jossa oli valmiina kaikki johtojen mallinnuksessa tarvittavat tiedot.

5.3 Varavoimaverkosta tutkittavat asiat

Porvoon jalostamon varavoimaverkossa suoritettiin tehotasapainon tarkastelu, vikatarkastelu sekä verkon laatutarkastelu. Tehotasapainon tarkastelussa tutkittiin, voidaanko nykyisillä dieselgeneraattoreilla tuottaa varavoimaverkon tarvitsema tehotarve. Tarkastelut suoritettiin jokaiselle generaattorisarekkeelle erikseen.

Varavoimaverkkoon mallinnetut kuormitukset olivat suurelta osin arvioita, sillä suurimmasta osasta varavoimaverkkoa ei ollut saatavilla esimerkiksi virtamittaustietoja. Varavoimaverkossa syntyneet häviöt olivat myös vain suuntaa antavia, sillä varavoimaverkon mallinnuksessa huomioitiin vain varavoimaverkon keskusten väliset kaapeloin-

nit. Kojoiden syöttökaapeleissa aiheutuvat tehohäviöt pyrittiin kuitenkin ottamaan huomioon kuormien mallinnuksessa.

Porvoon jalostamon varavoimaverkon vikatarkastelussa tutkittiin, onko varavoimaverkossa riittävästi oikosulkutehoa suojausien laukaisuun. Suojausien selektiivisyyttä tutkittiin myös mahdollisuuksien mukaan.

Varavoimaverkoston liittyvistä pienjännitekeskustoista tutkittiin suurimman sulakkeen laukaisun toteutuminen yksivaiheisella maasululla. Mikäli varavoimakiskoon kytketyn suurimman sulakkeen suojaus toteutui pienimmällä mahdollisella vikavirralla, tehtiin päätelmä, että myös pienjännitekeskossa olevat pienemmät sulakkeet avaavat vioittuneen virtapiirin vikatapauksissa. Varavoimaverkon varavoimakeskusten välisistä pien- ja keskijännitejohto-osuuksista tutkittiin kuitenkin jokaisen yhteyden suojaus erikseen kolmivaiheisella vikavirralla.

Porvoon jalostamon 10 kV:n varavoimaverkon oikosulkusuojaus on toteutettu muuntajien alajännitepuolella olevilla suojaareleilla sekä muutamilla 10 kV:n verkkoon asennetuilla sulakkeilla. Suojaareleiden ja sulakkeiden toiminta vikatilanteissa tarkastettiin mallintamalla kolmivaiheinen oikosulku muuntamoiden 10 kV:n kiskoihin.

Maasulkujen indikointiin 10 kV:n varavoimaverkossa käytetään maasulkukenttiä, joilla tarkkaillaan 10 kV:n verkon nollajännitettä. Maasulkujen indikoinnin toteutumista ei kuitenkaan tutkittu 10 kV:n varavoimaverkossa.

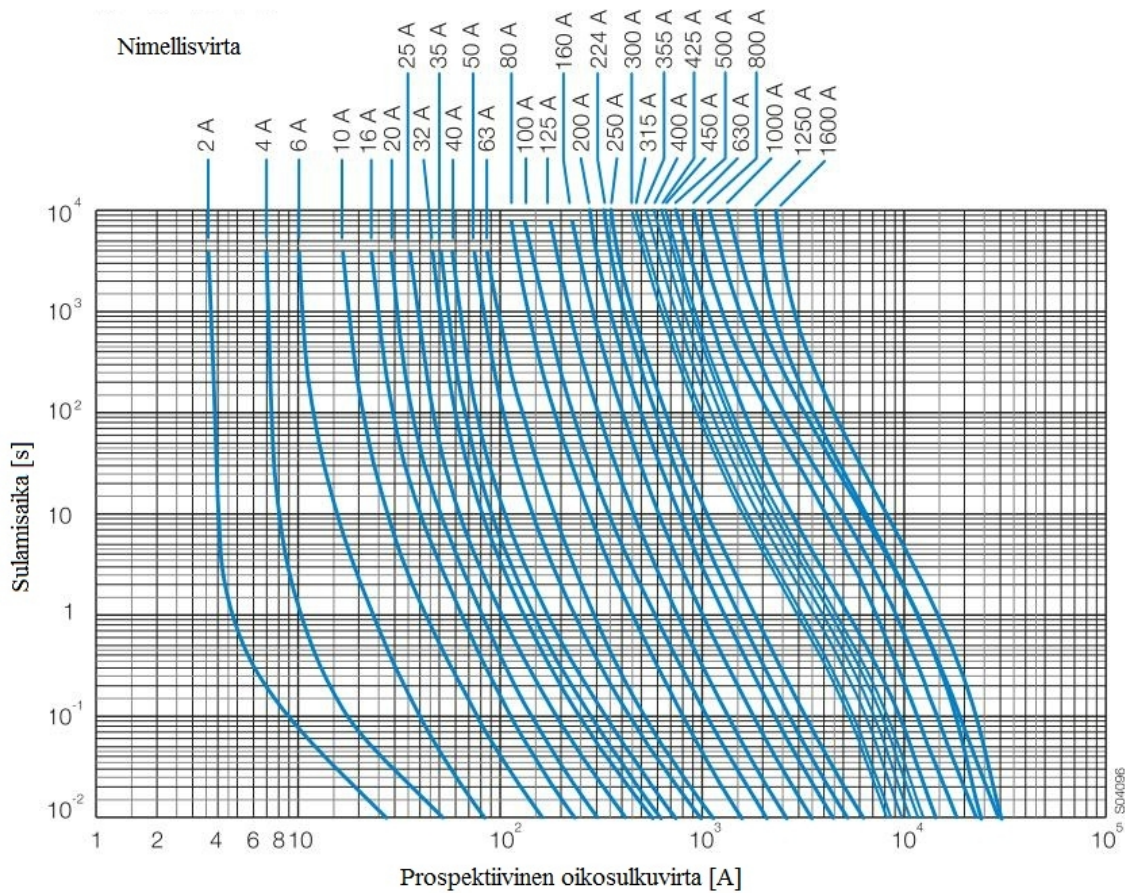
Vikavirrat tutkittiin standardin SFS-600 mukaan. TN-järjestelmässä sallitaan korkeintaan viiden sekunnin poiskytkentäaika pääjohdoille ja ryhmäjohdoille, jotka on suojattu yli 32 ampeerin suojalaitteella. Muissa 400 voltin nimellisjännitteen piireissä vaaditaan 0,4 sekunnin poiskytkentäaika. 690 voltin nimellisjännitteisissä piireissä poiskytkentäaika korkeintaan 32 ampeerin suojalaitteilla suojatuille piireille on 0,2 sekuntia. (SFS 600 2007, s. 125.)

Vikavirtojen mittaustuloksissa on esitetty pienjännitekeskuksille yksivaiheisen maasulun vikavirrat ja oikosulkutehot sekä kerrottu, toteutuuko suojaus vaaditussa toiminta-ajassa. Muuntamoiden varavoimakeskusten välisten johto-osuuksien suojaus tutkittiin 400 voltin ja 10 kV:n verkossa kolmivaiheisella oikosululla. Mittaustuloksissa on esitetty, miten johto-osuuksien suojaukset on toteutettu ja miten suuri vikavirta johdoilla kulkee sekä toiminta-ajat, jonka suojalaitteet tarvitsevat vikojen poistamiseen.

Sulakkeiden toiminta-aikojen tutkittaessa apuna käytettiin ABB:n OFAF-sarjan gG- ja aM-tyypin sulakkeiden virta-aikakäyriä sekä ABB:n CEF-tyypin keskijänniteverkon suojaukseen tarkoitettujen sulakkeiden virta-aikakäyriä.

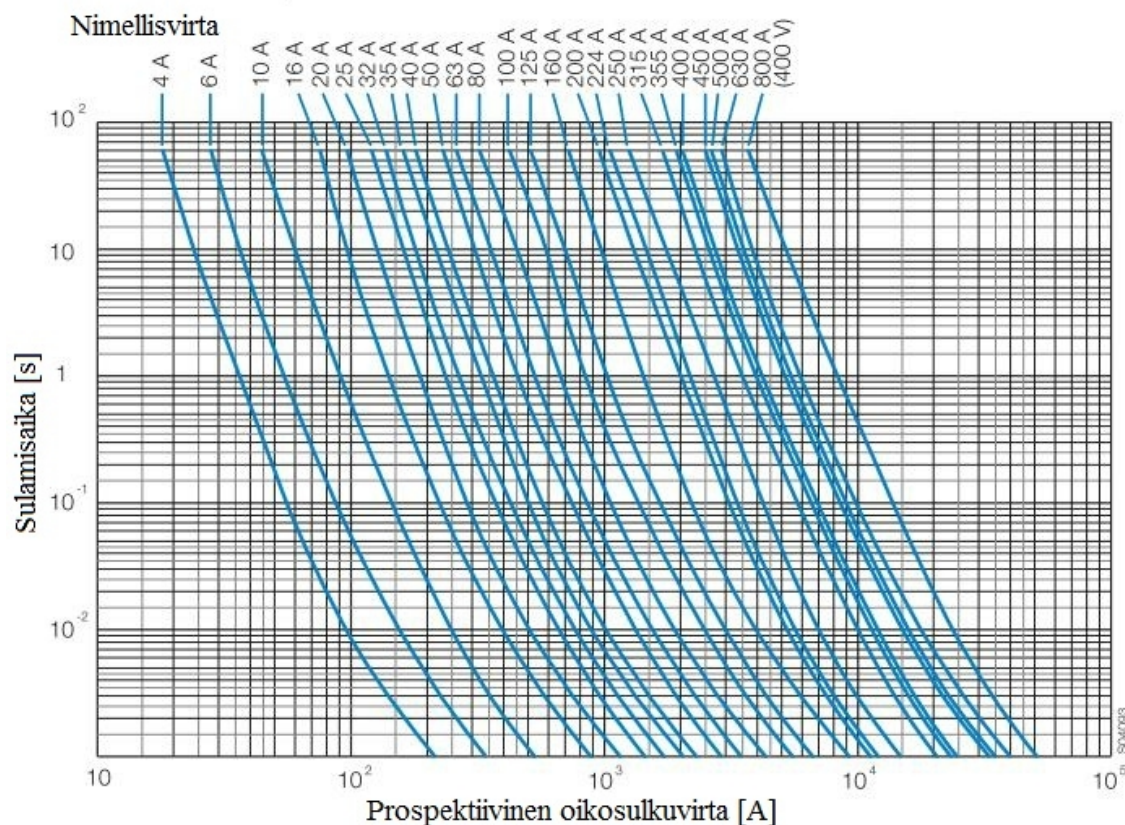
Sulakkeiden katkaisualue ja käyttöluokka ilmaistaan kirjainlyhenteillä. Kirjainlyhenne g ilmaisee, että sulake soveltuu oikosulku- ja ylikuormitussuojaksi, tällaisen sulakkeen toiminta on taattu koko virta-alueella. Kirjainlyhenne a ilmaisee, että sulake soveltuu ainoastaan oikosulkusuojaukseen. Kirjainlyhenne G kertoo, että sulake toimii nopeasti ja M ilmoittaa, että sulake toimii hitaasti. Moottoripiirien suojauksessa käytetään hitaita sulakkeita, jotta sulakkeet eivät palaisi moottorien käynnistysvirtasäyksistä. (ABB 2012 a, s. 6.)

Kuvassa 5.3 on esitetty gG-tyyppin yleissulakkeille tarvittavat prospektiiviset oikosulkuvirrat sulamisajan mukaan.



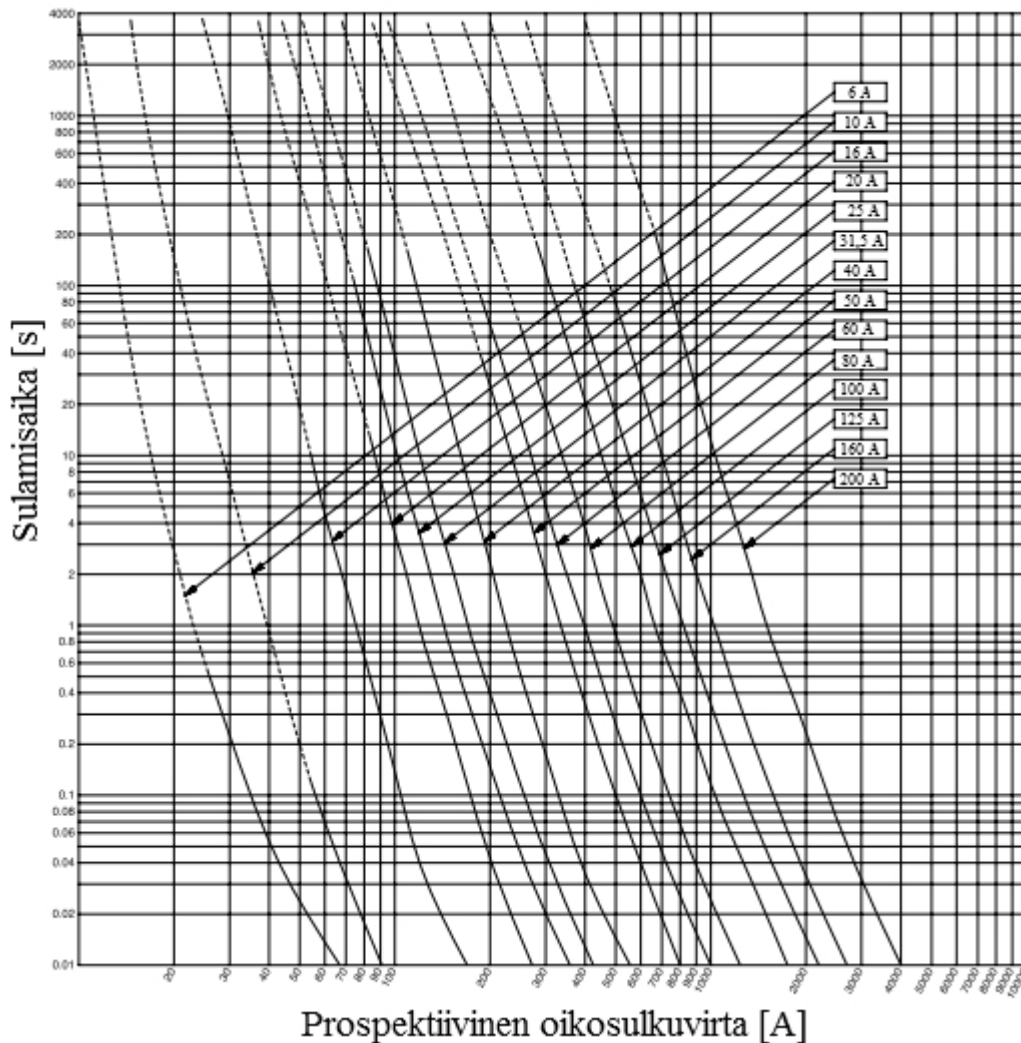
Kuva 5.3. gG-tyyppin sulakkeiden laukaisuun tarvittava prospektiivinen oikosulkuvirta eri toiminta-ajoille (ABB 2012 a, s. 25.).

Kuvassa 5.4 on esitetty moottorien suojauksessa käytettyjen aM-tyyppin sulakkeiden virta-aikakäyrät sulamisajan mukaan.



Kuva 5.4. aM-tyyppin sulakkeiden laukaisuun tarvittava prospektiivinen oikosulkuvirta eri toiminta-ajoille (ABB 2012 a, s. 29.).

Kuvassa 5.5 on esitetty Porvoon jalostamon varavoimaverkon keskijänniteverkon oikosulkusuojauksen tarkastelussa käytettyjen sulakkeiden virta-aikakäyriä. Keskijänniteverkon sulakkeilla pyritään estämään verkkoon kytkettyjen muuntajien vaurioituminen. Varavoimaverkkoon liitettyjen suojareleiden toiminta-ajat vikavirroille katsottiin kyseisen suojareleen manuaalista. (ABB 2012 b, s. 9.).



Kuva 5.5. CEF-tyypin keskijänniteverkon sulakkeiden virta-aikakäyrät (ABB 2012 b, s. 9.).

Porvoon jalostamon varavoimaverkon laatutarkastelussa keskityttiin jännitteenalenemien tarkasteluihin. Verkkoon liitettyjen laitteiden ikään tai yleiskuntoon ei kiinnitetty huomiota. Varavoimaverkon mallinnuksessa on otettu huomioon suunnitella olevien muuntamoiden aiheuttamat muutokset varavoimaverkossa.

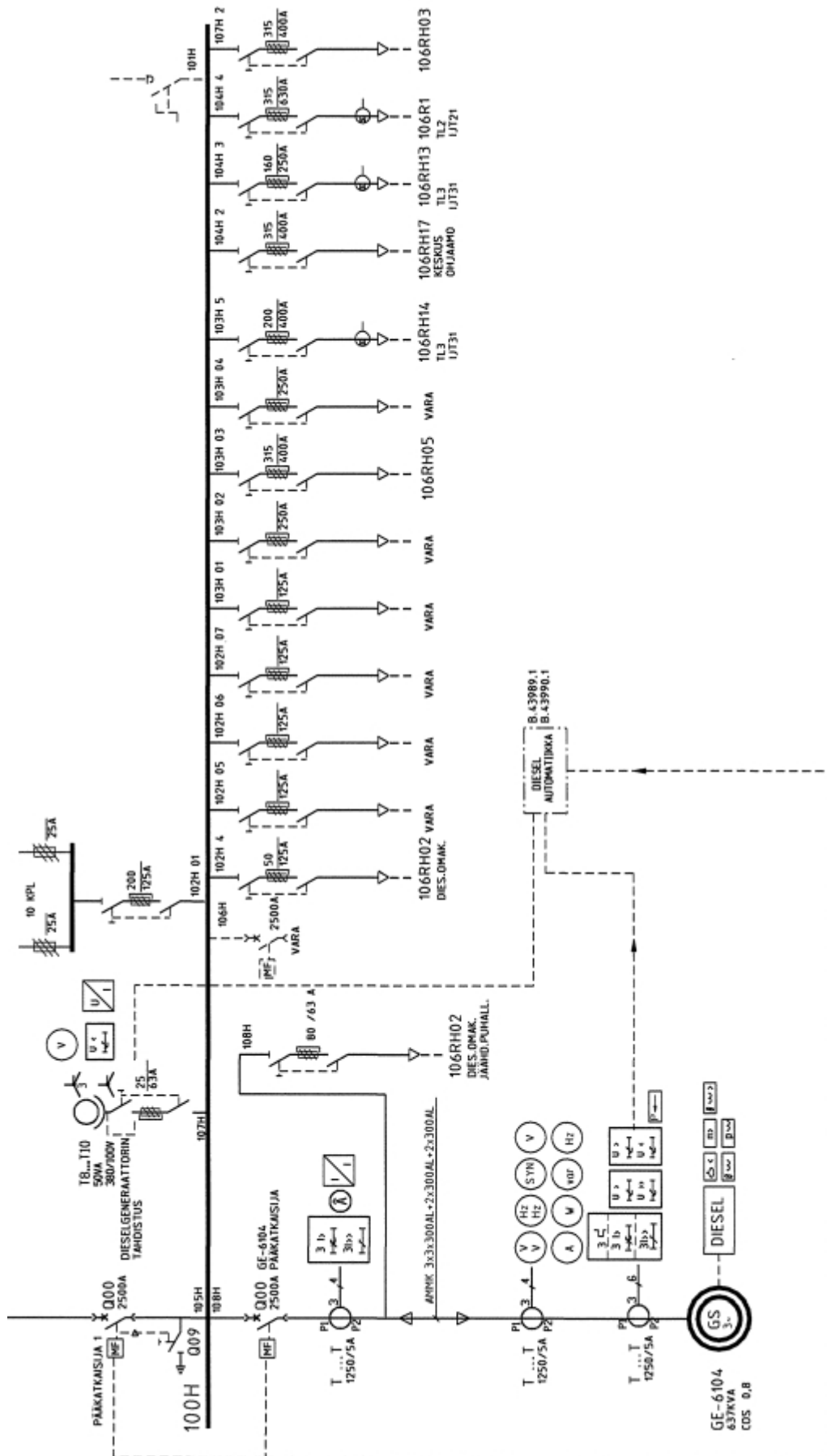
Varavoimaverkon varavoimakeskuksissa jännitteen tulee olla -2 %...+5 % ja kojeella ± 5 %:a nimellijännitteestä. Sallitut jänniterajat pohjautuvat IEC 60034-1 Rotating electrical machines -standardiin, jossa on määritelty sähkömoottoreiden ja generaattoreiden toimintaolosuhteet.

Moottorin tuottama vääntömomentti riippuu neliöllisesti jännitteestä, joten 5 %:n jännitteenalenemalla moottorin vääntömomentista on käytettävissä enää 90,25 %:a. Riippuen moottorin kuorman vastamomentin suuruudesta, moottorin momenttikäyrän muodosta, moottorin kippimomentin suuruudesta ja muista moottorin toimintaan vaikuttavista parametreista, voi olla, että suurella jännitteenalenemalla moottori ei jaksakaan enää pyöriä normaalinopeutta vaan pyörimisnopeus putoaa voimakkaasti. Tästä aiheutuu roottorivirran voimakas kasvu ja moottorin todennäköinen vaurioituminen.

5.4 Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 syöttämät alueet

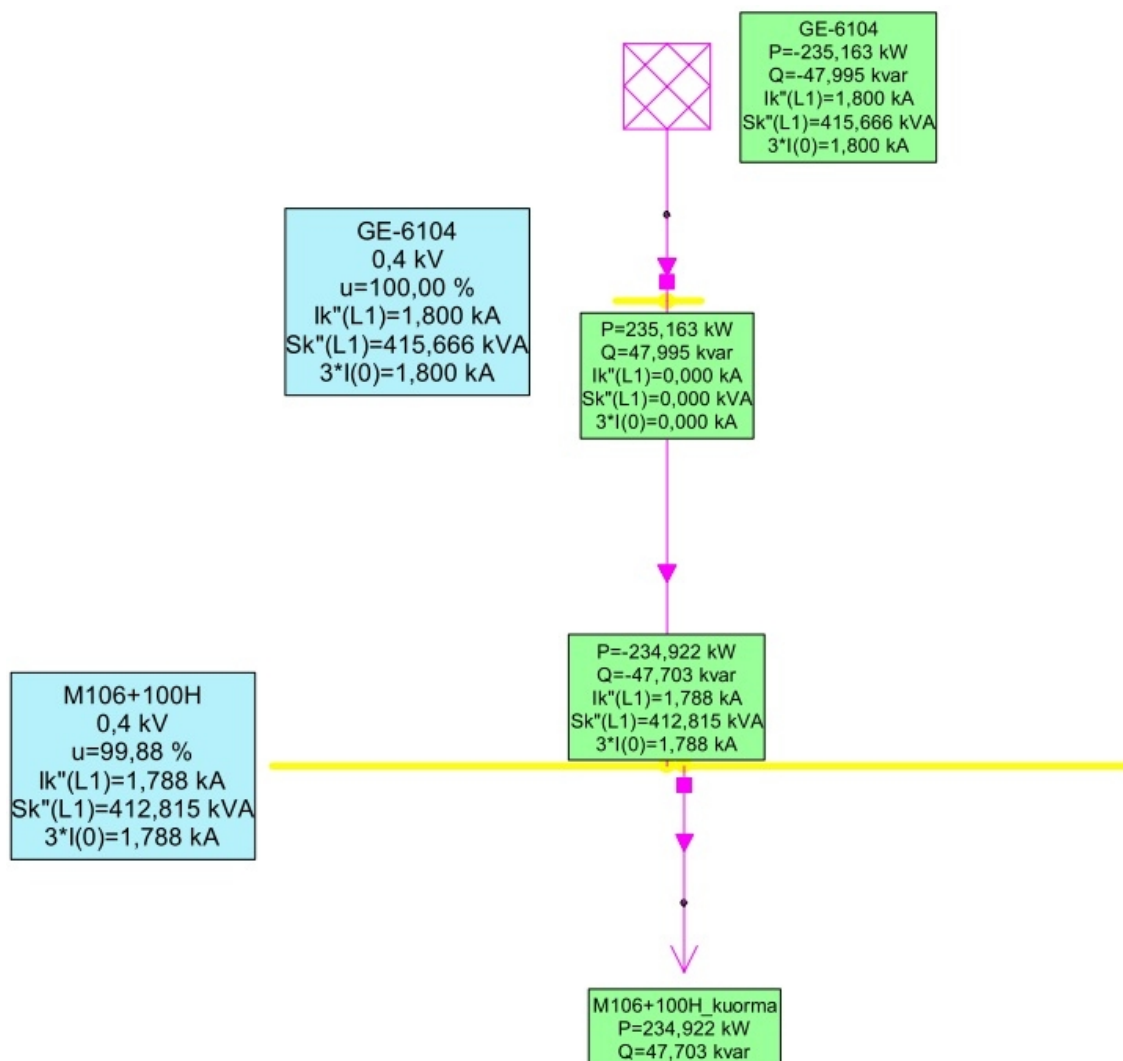
Generaattorit GE-6104 ja GE-6105 sijaitsevat muuntamolla M106 ja niillä varmistetaan instrumenttijännitelaitoksen toimivuus häiriötilanteissa. Generaattorit GE-6104 ja GE-6105 eivät ole yhteydessä muihin varavoimaverkon generaattoreihin, vaan niillä syötetään ainoastaan muuntamon M106 varavoimakeskuksia M106+100H ja M106+200H. Generaattori GE-6104 on kytketty muuntamon M106 varavoimakiskoon M106+100H ja generaattori GE-6105 on kytketty muuntamon M106 varavoimakiskoon M106+200H.

Kuvassa 5.6 on esitetty generaattorin GE-6104:n syöttämä saareke varavoimatilanteessa. Generaattori GE-6104 kytkeytyy kiinni kiskoon M106+100H, kun kiskon jännite pysyy alle 70 %:ssa nimellisarvosta riittävän kauan. Samalla pääkatkaisija 1 avautuu ja generaattori GE-6104 saareke toimii omana kokonaisuutenaan. Instrumenttijännitteiden lisäksi kiskoon M106+100H on kytketty dieselgeneraattorin ohjauslaitteiden jännitesyötöt.



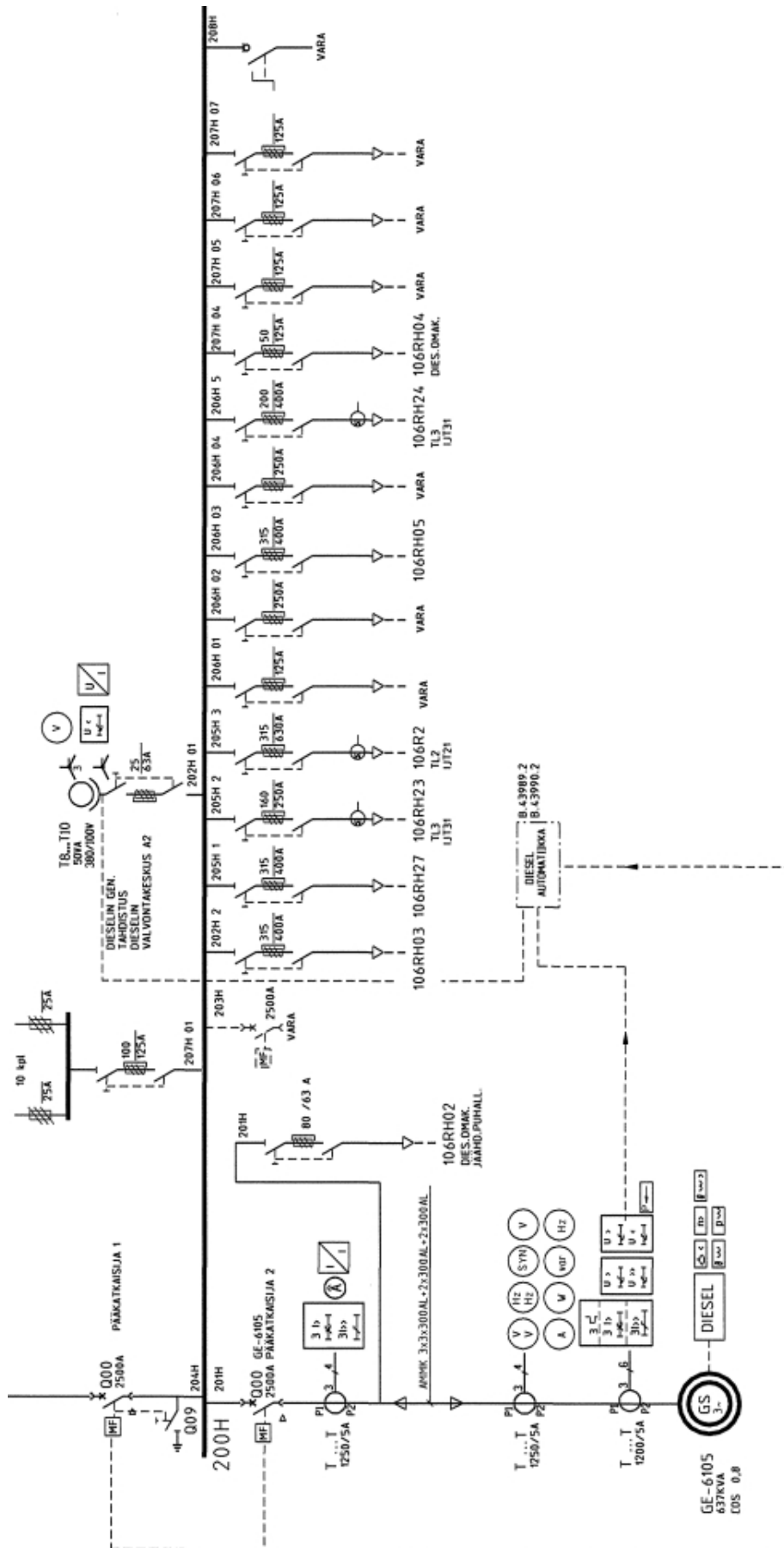
Kuva 5.6. Generaattori GE-6104 ja varavoimakeskus M106+100H.

Kuvassa 5.7 on generaattori GE-6104:n saareke NEPLAN:iin mallinnettuna. Tehon kulkusuunta kuvassa 5.7 on ylhäältä alaspäin. Ylimpänä on mallinnettuna generaattori GE-6104, joka syöttää kiskolla M106+100H olevaa kuormaa M106+100H_kuorma. NEPLAN:n näytöllä näkyy generaattorin, kiskojen ja kuormien jännite-, virta- ja tehoarvoja. NEPLAN:sta saadut laskentatulokset on esitetty tarkemmin luvuissa 5.4.1 ja 5.4.2.



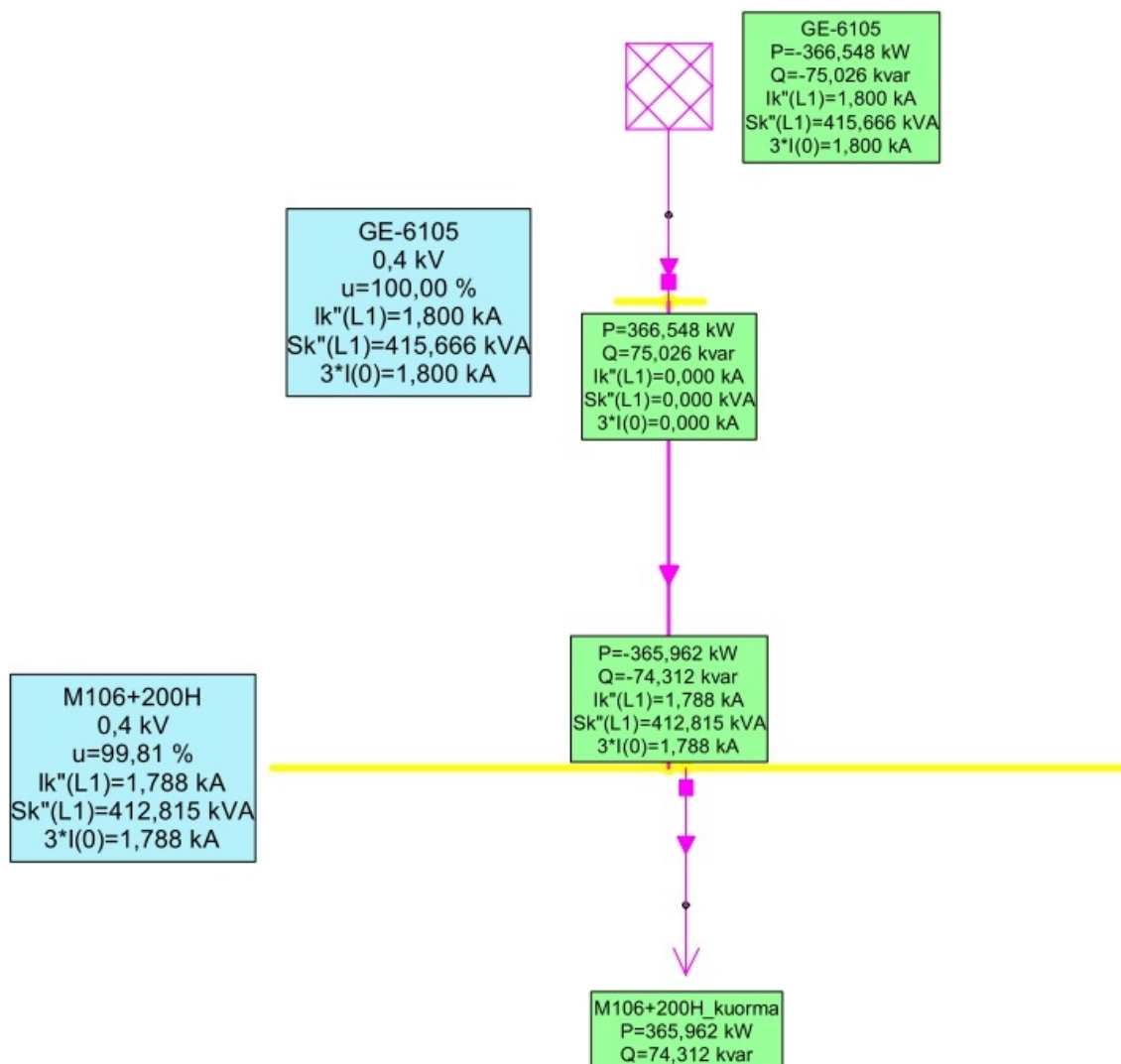
Kuva 5.7. Generaattori GE-6104 ja kisko M106+100H NEPLAN:iin mallinnettuna.

Kuvassa 5.8 esitetyn generaattori GE-6105:n saarekkeen toimintakuvaus on sama kuin generaattorilla GE-6104, sillä erotuksella, että generaattorin GE-6105 toimintaa ohjaa M106+200H kiskon jännite. Sekä generaattori GE-6104:n että GE-6105:n nimellisteho on 637 kVA.



Kuva 5.8. Generaattori GE-6105 ja varavoimakeskus M106+200H.

Kuvassa 5.9 on esitetty generaattori GE-6105:n saareke NEPLAN:iin mallinnettuna. Saareke on rakenteeltaan samanlainen kuin generaattori GE-6104:n syöttämä saareke.



Kuva 5.9. Generaattori GE-6105 ja kisko M106+200H NEPLAN:iin mallinnettuna.

Muuntamon M106 varavoimakiskoilla M106+100H ja M106+200H olevien kuormien tehonkulutus on saatu kiskojen virtamittauksista. Kuvan 5.5 M106+100H kiskon kuormien yhteenlaskettu virta oli 346 A ja kuvan 5.7 M106+200H kiskon kuormien yhteenlaskettu virta oli 539 A. Kummankin kiskon nimellisjännite on 400 V ja kuormien tehokertoimena käytettiin 0,98:aa, joten mallinnetut pätötehot kiskoille M106+100H ja M106+200H olivat 235 kW ja 366 kW.

5.4.1 Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 tehotasapaino ja jännitteenalenema

Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 nimellistehot ovat 637 kVA ja kummankin generaattorin tehokerroin on 0,8. Pitkäaikaisessa käytössä generaattorilta saatava nimellis-pätöteho on 510 kW. Generaattoreita voidaan kuormittaa lyhytaikaisesti nimellistehoa

suuremmalla kuormalla, mutta tehotasapainoa tutkittaessa on käytetty generaattoreiden nimellistehoa. Taulukossa 5.1 on esitetty NEPLAN:sta saadut tehotasapainon laskentatulokset muuntamon M106 saarekkeille varavoimakäytössä.

Taulukko 5.1. Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 syöttämien saarekkeiden tehotasapaino.

Saareke		Tuotettu teho		Kulutettu teho			
Generaattori	Nimellisteho [kW]	P_{Gen} [kW]	Q_{Gen} [kVar]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]	P_{Loss} [kW]	Q_{Loss} [kVar]
GE-6104	510,00	235,16	47,99	234,92	47,70	0,24	0,29
GE-6105	510,00	366,55	75,03	365,96	74,31	0,59	0,71

Taulukossa 5.1 on esitetty, mihin generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 tuottama pätö- ja loisteho kuluvat. Taulukon 5.1 arvoista nähdään, että kumpikin generaattori toimii selvästi alle nimellistehon. P_{Load} ja Q_{Load} sarakkeissa on ilmoitettu kuormien tarvitsemat pätö- ja loistehot. P_{Loss} ja Q_{Loss} sarakkeissa on ilmoitettu saarekkeissa tapahtuvat pätö- ja loistehohäviöt.

Muuntamon M106 varavoimakiskojen M106+100H ja M106+200H kuormat on mallinnettu yhtenä vakiokuormana, eikä jokaisen lähdön kaapelia ole mallinnettu erikseen. Tästä johtuen saarekkeiden yhteenlasketut häviöt ovat todellisuudessa enemmän kuin 0,83 kW ja 1,01 kVar. Kaapeleissa aiheutuvat häviöt ovat kuitenkin niin pieniä, että niiden huomiotta jättäminen ei aiheuta suurta virhettä laskentatuloksiin. Laskentatuloksista voidaan päätellä, että generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 tuottama teho riittää kattamaan saarekkeiden varavoimakuormat varavoimakäytössä.

Taulukoissa 5.2 ja 5.3 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 syöttämällä saarekkeilla varavoimakäytössä. Työssä keskitytään varavoimaverkon muuntamoiden kiskojen jännitetasoihin, mutta jännitteen ollessa varavoimakiskossa lähes 100 %, voidaan olettaa, että kiskosta lähtevän kaapelin päässä olevalla kojeella jännite on myös lähes nimellisarvossa.

Taulukko 5.2. Generaattorin GE-6104:n ja varavoimakiskon M106+100H jännitteet, jännitteiden kulmat ja tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]
GE-6104	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00
M106+100H	0,40	99,88	-0,10	234,90	47,70

Taulukko 5.3. Generaattorin GE-6105:n ja varavoimakiskon M106+200H jännitteet, jännitteiden kulmat ja tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]
GE-6105	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00
M106+200H	0,40	99,81	-0,10	366,00	74,30

Taulukoissa 5.2 ja 5.3 solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä kiskon jännitteestä on kyse. Liitteessä yksi on esitetty kaikki NEPLAN:sta saadut laskentatulokset muuntamon M106 saarekkeille varavoimakäytössä.

5.4.2 Generaattoreiden GE-6104 ja GE-6105 syöttämien alueiden vikavirtatarkastelu

Saarekkeiden vikavirtatarkasteluissa on tutkittu, toteutuuko virtapiirien oikosulkusuojaus riittävän nopeasti varavoimakäytössä. Muuntamon M106 varavoimakiskot syöttävät instrumenttijännitekeskuksia ja lähtöjen sulakkeet ovat nimellisvirraltaan yli 32 A, joten sulakkeilta vaadittava toiminta-aika on viisi sekuntia.

Taulukossa 5.4 on esitetty vikapaikkojen alkutilan oikosulkuvirta I_k'' ja oikosulkuteho S_k'' sekä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k ja oikosulkuteho S_k yksivaiheisessa maasulussa. Sarakkeissa on ilmoitettu myös vikapaikka, vikapaikan nimellisjännite U_n , vikapaikan nimellisvirraltaan suurin suojalaite sekä siltä vaadittava toiminta-aika.

Taulukko 5.4. Vikapaikkojen oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot sekä suojauksien tarkastelu 1-vaiheisen maasulun vikavirroilla.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
M106+100H	0,4	gG 315 A, 5s	8,25	5,72	2,73	0,63	Kyllä
M106+200H	0,4	gG 315 A, 5s	8,25	5,72	2,73	0,63	Kyllä

GG 315 A sulakkeelta vaaditaan kuvan 5.3 mukaisesti 2 kA:n prospektiivinen virta, jotta sulake toimisi viidessä sekunnissa. Muuntamon M106 varavoimakiskoista lähtevät syötöt instrumenttijännitekeskuksille ovat pituudeltaan joitain kymmeniä metrejä, joten instrumenttijännitekeskuksilla vikavirrat eivät poikkea huomattavasti muuntamon M106:n varavoimakiskojen vikavirroista.

Taulukossa 5.4 pysyvän tilan vikavirta I_k yksivaiheisessa maasulussa vikapaikoissa M106+100H ja M106+200H on 2,73 kA, eli sulakkeet toimivat vaadituissa toiminta-ajoissa. Taulukon 5.4 vikavirta-arvojen perusteella voidaan sanoa, että myös lähdöllä olevat nimellisvirraltaan pienemmät sulakkeet toimisivat vikatilanteissa. Oikosulun tapahtuessa muuntamon M106:n kiskoilla M106+100H tai M106+200H, generaattoreiden automatiikka kytkee generaattorin irti siihen kytketystä kiskosta.

5.5 Generaattorin GE-6106 syöttämä alue

Generaattorit GE-6106, GE-6107, GE-6109, GE-6110 ja GE-6113 syöttävät varavoimatehoa Porvoon jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkkoon, kuten kuvassa 5.2 on esitetty. Alueiden varavoimajakelukaavio saarekerajoineen NEPLAN:lla mallinnettuna on esitetty liitteessä kaksi. NEPLAN:sta saadut laskentatulokset alueen tehonja-

oille, jännitteenalenemille ja vikavirroille varavoimakäytössä on esitetty liitteessä kolme.

Generaattori GE-6106 sijaitsee muuntamolla M108 ja sillä syötetään varavoimaa TL 1:n, jakeluterminaalin sekä säiliöalueen muuntamoille. Syötettäviä muuntamoita on yhteensä 14 kappaletta. Muuntamoiden kuormat koostuvat pääosin aluevalaistuksesta. Suurin moottori, generaattori GE-6106:n syöttämässä saarekkeessa on muuntamolta M17 syöttönsä saava moottori TGDM-17, jonka nimellispätöteho on 22 kW.

Jänniterele kytkee generaattori GE-6106:n kiinni muuntamon M108:n kiskoon M108+100H, kun kiskon jännite pysyy alle 70 %:ssa nimellisarvosta riittävän kauan. Samalla automaattinen syötönvaihto aukaisee yhteyden muuntamon M19 kennolle M19+211C, josta normaalitilanteessa tulee syöttö muuntamon M108+100H kiskossa oleville kojeille.

Generaattorin GE-6106 nimellisteho on 685 kVA ja sen tehokerroin on 0,8. Pitkäaikaisessa käytössä generaattorilta saatava pätöteho on 548 kW. Generaattoria voidaan kuormittaa hetkellisesti nimellistehoa suuremmalla kuormalla, mutta tehotasapainoa tutkittaessa NEPLAN:ssa on käytetty generaattorin nimellistehoa.

Generaattorin GE-6106:n syöttämän alueen muuntamoista ei ollut saatavissa virtamittaustietoja, joten kaikki alueella olevat kuormat ovat arvioita. Arviot on tehty sähkönkäyttöluetteloiden ja jakelukaaviokuvien perusteilla. Kuormituksia mallinnettaessa on oletettu, että kaikki varavoimaverkkoon liitetyt lamput, moottorit ja muut kuormat ovat kytkettyinä päälle ja ne toimivat täydellä teholla.

5.5.1 Generaattori GE-6106 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema

Muuntamo M108 sijaitsee TL 1:n alueella. Varavoimatilanteessa muuntamolta M108 tuleva TL 1 -alueen tehosyöttö suoritetaan 400 voltin jännitetasossa. Jakeluterminaali ja säiliöalueen tehosyöttö suoritetaan puolestaan 10 kV:n jännitetasossa, koska näillä alueilla muuntamoiden väliset välimatkat ovat selvästi pidempiä kuin jalostusalueella.

Taulukossa 5.5 on esitetty NEPLAN:sta saadut tehotasapainon laskentatulokset generaattorin GE-6106:n syöttämälle saarekkeelle varavoimakäytössä.

Taulukko 5.5. Generaattori GE-6106 syöttämän saarekkeen tehotasapaino.

Saareke		Tuotettu teho		Kulutettu teho			
Generaattori	Nimellisteho [kW]	P _{Gen} [kW]	Q _{Gen} [kVar]	P _{Load} [kW]	Q _{Load} [kVar]	P _{Loss} [kW]	Q _{Loss} [kVar]
GE-6106	548,00	345,13	97,28	333,90	135,87	11,23	-38,59

Taulukossa 5.5 on esitetty, mihin generaattorin GE-6106 tuottama pätö- ja loisteho kuuluu. GE-6106:n syöttämien muuntamoiden kuormat kuluttavat pätötehoa yhteensä 345,13 kW ja loistehoa 97,28 kVar. GE-6106:n syöttämän saarekkeen johdoilla ja muuntajissa tapahtuvat pätötehohäviöt ovat 11,23 kW. Saarekkeen johdot toimivat aliluonnollisella teholla, sillä ne tuottavat loistehoa 38,59 kVar. Mallinnuksessa on huomi-

oitu vain varavoimakeskusten väliset johto-osuudet, joten todellisuudessa johtojen aiheuttama tehohäviö on suurempi kuin taulukossa 5.5 ilmoitetut tehohäviöt.

Taulukossa 5.6 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset solmupisteiden jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattorin GE-6106 syöttämällä alueella varavoimatilanteessa. Solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä solmupisteen tuloksista on kyse.

Taulukko 5.6. *Generaattorin GE-6106:n sekä varavoimakiskojen jännitteet, jännitteiden kulmat ja kulutetut tehot.*

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P _{Load} [kW]	Q _{Load} [kVar]
GE-6106	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,40	98,74	0,00	150,00	43,80
M1+100G	9,97	99,71	-0,50	0,00	0,00
M108+100G	9,97	99,72	-0,50	0,00	0,00
M108+100H	0,40	99,69	-0,10	10,00	2,00
M12	0,39	98,44	-0,90	1,00	0,20
M17+100G	9,97	99,72	-0,50	0,00	0,00
M17+V	0,40	98,69	-0,90	28,90	14,50
M19+100H	0,39	96,76	2,00	30,00	52,00
M19+211C	9,97	99,70	-0,10	0,00	0,00
M3+100H	0,40	99,63	-0,10	14,00	2,80
M4+100H	0,38	94,19	0,10	46,00	9,30
M5+20	0,40	99,69	-0,10	0,00	0,00
M6+100H	0,40	99,45	0,00	1,00	0,30
M7+100H	0,39	97,93	-1,30	1,00	0,30
M7+V	0,39	97,89	-1,30	0,00	0,00
M79+100H	0,40	98,80	-1,20	5,00	1,00
M8	0,39	96,74	-1,20	5,00	1,00
PK_7R15_TOIMISTO	0,39	96,81	-1,30	1,00	0,20
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA-025	0,39	98,55	-0,90	1,00	0,20
TERVEYSTALO	0,39	98,28	-1,20	5,00	1,00
VESILAITOS_K11	0,40	99,07	-0,10	15,00	3,00
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,39	97,05	-1,30	20,00	4,10

Taulukosta 5.6 selviää, miten epätasaisesti kuormat ovat jakaantuneet saarekkeen eri muuntamoille. Nimellisjännitteeltään 10 kV:n varavoimakiskoissa ei ole ollenkaan kuormitusta, vaan ne toimivat ainoastaan solmupisteinä tehonsiirrossa. 10 kV:n kiskot erottaa +100G päätteestä tunnuksen nimessä. Osa pienjännitekiskoista on myös ilman kuormitusta. Suurin kuormitus on instrumenttitilaa PK01:ssä, jonka tehosityöttö tulee muuntamon M108:n lähdöltä M108+107H3.

Solmupisteen M4+100H jännite on taulukon 5.6 mukaan noin 94 %:a nimellisjännitteestä. Muuntamalla M4 olevat kuormat koostuvat pääosin muuntamon sekä sen lähi-alueiden valaistuksesta. Porvoon jalostamon varavoimaverkossa suurin sallittu jännitteenalenema varavoimakeskusten kiskolla on kuitenkin 2 %, joten myös solmupisteen M4+100H lisäksi solmupisteissä M19+100H, M7+V, M8+100H,

PK_7R15_TOIMISTO ja VVK-LÄHETTÄMÖ on liian alhainen jännite varavoimakäytössä.

5.5.2 Generaattori GE-6106 syöttämän alueen vikatarkastelu

Generaattorin GE-6106 syöttämän alueen vikatarkastelussa on tutkittu, toteutuuko virtapiirien oikosulkusuojaus vaaditussa toiminta-ajassa varavoimakäytössä. Pienjänniteverkosta on tutkittu jokaisen varavoimaverkkoon liitetyn kiskon suurimman sulakkeen toiminta yksivaiheisen oikosulun vikavirralla. Varavoimaverkon kiskojen väliset suojaukset sekä 10 kV:n varavoimaverkkoon kytkettyjen suojauksien toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirralla.

Taulukossa 5.7 on esitetty generaattori GE-6106 syöttämän alueen pienjänniteverkon eri vikapaikkojen alkutilan oikosulkuvirta I_k'' ja oikosulkuteho S_k'' sekä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k ja oikosulkuteho S_k yksivaiheisessa maasulussa. Sarakkeissa on ilmoitettu myös vikapaikka, vikapaikan nimellisjännite U_n , vikapaikan nimellisvirraltaan suurin suojalaite sekä siltä vaadittava toiminta-aika.

Taulukko 5.7. GE-6106 syöttämän saarekkeen pienjännitesolmupisteiden oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot sekä suojauksien tarkastelu 1-vaiheisessa maasulussa.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
GE-6106	0,4		12,01	2,77	2,71	0,63	
VESILAITOS_K11	0,4	-	1,74	0,40	1,13	0,26	
INSTR.TILA_PK01	0,4	-	8,02	1,85	2,53	0,59	
M108+100H	0,4	gG 250 A, 5 s.	12,77	2,95	2,75	0,63	Kyllä
M3+100H	0,4	gG 80 A, 5 s.	8,88	2,05	2,57	0,59	Kyllä
M6+100H	0,4	gG 25 A, 5 s.	0,30	0,07	0,21	0,05	Kyllä
M4+100H	0,4	gG 80 A, 5 s.	0,58	0,14	0,41	0,10	Kyllä
M19+100H	0,4	gG 80 A, 5 s.	0,87	0,20	0,61	0,14	Kyllä
PK_7R15_TOIMISTO	0,4	gG 16 A, 5 s.	0,28	0,06	0,20	0,05	Kyllä
M79+100H	0,4	gG 160 A, 5 s.	2,85	0,66	1,49	0,34	Kyllä
TERVEYSTALO	0,4	gG 16 A, 5 s.	0,57	0,13	0,41	0,09	Kyllä
M7+100H	0,4	gG 125 A, 5 s.	1,40	0,32	0,92	0,21	Kyllä
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,4	gG 63 A, 5 s.	0,82	0,19	0,57	0,13	Kyllä
M7+V	0,4	gG 63 A, 5 s.	1,21	0,28	0,81	0,19	Kyllä
M8	0,4	gG 16 A, 5 s.	0,27	0,06	0,19	0,05	Kyllä
M5+20	0,4	-	1,71	0,40	1,10	0,25	
M17+V	0,4	gG 100 A, 5 s.	3,16	0,73	1,50	0,35	Kyllä
M12	0,4	-	0,29	0,07	0,21	0,05	
SÄILIÖAL_TUKIT_IA-025	0,4	-	0,50	0,12	0,36	0,08	

Taulukossa 5.7 on esitetty, toteutuuko muuntamoiden kiskoilla olevien nimellisvirta-arvoltaan suurimpien sulakkeiden suojaus varavoimakäytössä. Mikäli nimellisvirta-arvoltaan suurimman sulakkeen suojaus toteutuu, on tehty päätelmä, että myös samalla muuntamon kiskolla olevien nimellisvirta-arvoltaan pienempien sulakkeiden suojaus toteutuu vikatapauksissa. GG-tyypin sulakkeiden virta-aikakäyrät on esitetty kuvassa 5.3. Taulukon 5.7 arvojen perusteella generaattori GE-6106:n syöttämän alueen muun-

tamoissa pienjänniteverkon suojaus toteutuisi vikatapauksissa. Mikäli oikosulku tapahtuisi muuntamo M108:n kiskolla M108+100H, johon varavoimageneraattori GE-6106 on kytketty, varavoimageneraattorin automatiikka kytkisi generaattorin irti kyseisestä kiskosta.

Taulukossa 5.8 on esitetty generaattori GE-6106:n syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välisten johto-osuuksien suojauksien toteutuminen varavoimatilanteessa. Suojausten toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirroilla.

Taulukossa 5.8 on esitetty, mistä varavoimakeskusten välisestä johto-osuudesta on kyse. Johto-osuuden suojalaite -sarakeessa on esitetty, mikä suojalaite johto-osuudella on. 3-vaiheinen vikavirta -sarakeessa on esitetty johto-osuudelle asennetun suojalaitteen läpi menevä virta kolmivaiheisessa oikosulussa. Mikäli jollain johto-osuudella on useampi suojalaite, taulukossa on esitetty kummankin suojalaitteen toiminta-aika johto-osuuden vikavirralla.

Taulukko 5.8. Generaattori GE-6106 syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välillä johto-osuuksilla olevien suojalaitteiden toiminta-aika vikavirran mukaan.

Varavoima-keskukselta	Varavoima-keskukselle	Johto-osuuden suojalaite	3-vaiheinen vikavirta I_k [kA]	Toiminta-aika [s]
M108+100H	M108+100G	CEF 63 A	0,24	20
M108+100H	M108+100G	SUOJARELE	0,24	0,3
M108+100H	M3+100H	gG 50 A	8,09	< 0,1
M108+100H	M4+100H	gG 80 A	1,62	< 0,1
M108+100H	M6+100H	gG 80 A	0,82	< 0,1
M108+100H	M19+100H	gG 80 A	2,35	< 0,1
M108+100H	INSRT. TILA. PK01	gG 250 A	8,12	< 0,1
M108+100H	VESILAITOS K11	gG 250 A	3,71	< 0,1
M108+100H	M5+20	gG 125 A	3,47	< 0,1
M108+100G	M17+100G	-	0,24	
M108+100G	M1+100G	-	0,23	
M17+100G	M17+V	CEF 16 A	2,47	< 0,1
M17+V	M12	-	0,66	
M17+V	SÄIL.AL. TT. IA-025	-	1,04	
M1+100G	M79+100H	SUOJARELE	2,43	0,1
M1+100G	M79+100H	CEF 16 A	2,43	< 0,1
M79+100H	TERVEYSTALO	-	1,06	
M79+100H	M7+100H	SUOJARELE	1,70	0,1
M7+100H	VVK-LÄHETTÄMÖ	gG 125 A	1,37	< 0,1
M7+100H	M7+V	gG 63 A	1,70	< 0,1
VVK-LÄHETTÄMÖ	PK_7R15_TOIMISTO	gG 35 A	0,55	< 0,1
M7+V	M8	-	0,63	

Taulukon 5.8 toiminta-ajat sulakkeille on katsottu kuvien 5.3 ja 5.5 virta-aikakäyristä ja suojareleiden toiminta-ajat on katsottu kyseisen suojareleen laukaisukäyrästä. Suurin osa suojalaitteiden toiminta-ajoista on alle 0,1 sekuntia, josta voidaan päätellä, että verkon selektiivisyyttä pitäisi tutkia tarkemmin.

5.6 Generaattorin GE-6107 syöttämä alue

Generaattori GE-6107 sijaitsee muuntamolla M2 ja sillä syötetään varavoimaa TL 2 alueen sekä osaa TL 1 ja TL 3 alueen varavoimaverkon muuntamoita. Syötettäviä muuntamoita on yhteensä kahdeksan kappaletta. Muuntamoiden kuormat koostuvat pääosin moottoreista sekä alueen valaistuksesta. Suurin moottori, generaattori GE-6107:n syöttämässä verkossa on muuntamolla M2 syöttönsä saava moottori GAM-6167, jonka nimellispäteheho on 132 kW. Moottori GAM-6167 käynnistetään suora-käynnistyksellä.

Jänniterele kytkee generaattori GE-6107:n kiinni muuntamon M2 kiskoon M2+100H, kun kiskon jännite pysyy alle 70 %:ssa nimellisarvosta riittävän kauan ja dieselgeneraattori on saavuttanut nimellisen pyörimisnopeuden. Samalla automaattinen syötönvaihto aukaisee yhteyden kennolle M2+100F, josta normaalitilanteessa tulee syöttö muuntamon M2+100H kiskossa oleville kojeille. Kuvassa 5.2 on esitetty generaattori GE-6107:n syöttämä saareke.

Generaattori GE-6107:n nimellisteho on 685 kVA ja sen tehokerroin on 0,8. Pitkäaikaisessa käytössä generaattorilta saatava päteheho on 548 kW. Generaattoria voidaan kuormittaa hetkellisesti nimellistehoa suuremmalla kuormalla, mutta tehotasapainoa tutkittaessa NEPLAN:ssa on käytetty generaattorin nimellistehoa.

Generaattori GE-6107:n syöttämän alueen muuntamoista ei ollut saatavissa virtamittaustietoja, joten kaikki alueella olevat kuormat ovat arvioita. Arviot on tehty sähkönkäyttöluetteloiden ja jakelukaaviokuvien perusteilla. Kuormituksia mallinnettaessa on oletettu, että kaikki moottorit toimivat täydellä kuormalla ja kaikki varavoimaverkkoon liitetyt kuormat ovat kytkettyinä päälle.

5.6.1 Generaattori GE-6107 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema

Muuntamo M2 sijaitsee TL 1:n ja TL 2:n välissä. Näiden alueiden tehonsyöttö varavoimatilanteessa suoritetaan 400 voltin jännitetasossa. Muuntamo M33 sijaitsee TL 1:n alueella ja se on kauimmaisina muuntamo muuntamolta M2 katsottuna, jonne tehonsyöttö suoritetaan 400 voltin jännitetasossa. Muuntamo M2:n ja muuntamon M33:n välinen etäisyys on noin 850 m ja muuntamolta M2 syötettävä varavoima TL 3:n alueelle suoritetaan 10 kV:n jännitetasossa.

Taulukossa 5.9 on esitetty NEPLAN:sta saadut tehotasapainon laskentatulokset generaattorin GE-6107 syöttämälle saarekkeelle varavoimatilanteessa.

Taulukko 5.9. Generaattori GE-6107 syöttämän saarekkeen tehotasapaino.

Saareke		Tuotettu teho		Kulutettu teho			
Generaattori	Nimellisteho	P_{Gen}	Q_{Gen}	P_{Load}	Q_{Load}	P_{Loss}	Q_{Loss}
	[kW]	[kW]	[kVar]	[kW]	[kVar]	[kW]	[kVar]
GE-6107	548,00	486,13	225,33	472,90	221,97	13,23	3,36

Taulukossa 5.9 on esitetty, mihin generaattori GE-6107:n tuottama pätö- ja loisteho kuluu. Saarekkeen muuntamoilla olevat kuormat kuluttavat pätötehoa yhteensä 472,9 kW ja loistehoa 221,97 kVar. GE-6107:n syöttämän saarekkeen johdoilla ja muuntajissa tapahtuvat pätö- ja loistehohäviöt ovat 13,23 kW:a ja 3,36 kVar:a. NEPLAN:n mallissa on mallinnettu vain muuntamoiden kiskojen väliset johto-osuudet, joten todellisuudessa johdoilla tapahtuvat häviöt ovat suuremmat kuin taulukon 5.9 P_{Loss} - ja Q_{Loss} -sarakeissa ilmoitetut arvot.

Taulukon 5.9 tuotettu teho -sarakeista huomataan, että generaattori GE-6107 toimii noin 88 %:n käyttöasteella. Vaadittava pätöteho maksimikuormitustilanteessa on noin 490 kW. Saarekkeen kuormien tehot ovat arvioita, mutta arvioiden perusteella tehtyjen laskentatulosten pohjalta voidaan päätellä, että generaattori GE-6107:n toimiessa nykyisen kytkentätilanteen täydellä kuormalla, nimellisteholtaan suurten oikosulkuvirtamootorin käynnistäminen voi olla hankalaa.

Taulukossa 5.10 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset solmupisteiden jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattori GE-6107:n syöttämällä alueella varavoimatilanteessa. Solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä solmupisteen tuloksista on kyse.

Taulukko 5.10. Generaattorin GE-6107:n sekä varavoimakeskusten jännitteet, jännitteiden kulmat ja tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]
GE-6107	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00
M081+500H	0,39	96,28	-1,80	32,00	14,10
M1+10H	0,37	92,23	0,70	1,00	0,20
M101+100H	0,39	96,53	-1,80	32,00	29,70
M101+200H	0,39	96,55	-1,80	31,40	10,50
M2+100H	0,40	99,52	0,00	158,80	79,00
M2+1100RH	0,40	99,51	0,00	5,00	1,00
M2+HR100	0,40	99,47	0,00	42,20	17,60
M28+100H	0,37	92,42	0,60	42,40	20,00
M28+200H	0,37	92,47	0,60	10,00	2,90
M28+300H	0,37	92,51	0,60	5,00	1,50
M28+V	0,37	92,52	0,60	0,00	0,00
M33+100H	0,36	89,52	1,50	12,10	7,60
M78-100H	0,39	97,24	-1,50	50,00	27,40
M81+9200RH	0,39	96,27	-1,80	5,00	1,00
M89+100H	0,39	97,56	-1,70	30,00	6,10
M89+100RH	0,39	97,55	-1,70	6,00	1,20
M89+RH200	0,39	97,52	-1,70	10,00	2,00
PKV_01	0,40	99,52	0,00	0,00	0,00
M2+100G	9,82	98,20	-1,00	0,00	0,00
M78+100G	9,82	98,17	-1,00	0,00	0,00
M89+100G	9,82	98,16	-1,00	0,00	0,00

Taulukon 5.10 P_{Load} -sarakeesta erottuu muuntamolla M2 olevat solmupisteet, joiden yhteenlaskettu pätöteho on 206 kW. Nimellisjännitteeltään 10 kV:n solmupisteissä ei ole kuormitusta lainkaan, vaan ne toimivat pelkästään solmupisteinä tehonsiirrossa.

Porvoon jalostamon varavoimaverkossa suurin sallittu jännitteenalenema varavoimakeskusten kiskolla on 2 % nimellisarvosta. Taulukon 5.10 arvoista nähdään, että raja alittuu muuntamoilla M1, M101, M28, M33, M78, M81 ja M89 sijaitsevilla solmupisteillä.

Muuntamon M33 kiskolla M33+100H jännite on vain noin 90 % nimellisjännitteestä. Samalla kiskolla on seitsemän kappaletta pienitehoisia oikosulkumoottoreita. Moottoreiden käynnistyksestä aiheutuva hetkellinen jännitteenalenema vaikeuttaa muuntamon M33 jännitteenlaatua entisestään.

5.6.2 Generaattori GE-6107 syöttämän alueen vikatarkastelu

Generaattori GE-6107 syöttämän alueen vikatarkastelussa on tutkittu, toteutuuko virtapiirien oikosulkusuojaus vaaditussa toiminta-ajassa varavoimakäytössä. Pienjänniteverkosta on tutkittu jokaisen varavoimaverkkoon liitetyn kiskon suurimman sulakkeen toiminta yksivaiheisen oikosulun vikavirralla. Varavoimakeskusten kiskojen väliset suojaukset sekä 10 kV:n varavoimaverkkoon kytkettyjen suojauksien toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirralla.

Taulukossa 5.11 on esitetty generaattori GE-6107 syöttämän alueen pienjänniteverkon eri vikapaikkojen alkutilan oikosulkuvirta I_k'' ja oikosulkuteho S_k'' sekä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k ja oikosulkuteho S_k yksivaiheisessa maasulussa. Sarakkeissa on ilmoitettu myös vikapaikka, vikapaikan nimellisjännite U_n , vikapaikan nimellisvirraltaan suurin suojalaite sekä siltä vaadittava toiminta-aika.

Taulukko 5.11. GE-6107 syöttämän saarekkeen pienjännitesolmupisteiden oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot sekä suojauksien tarkastelu 1-vaiheisessa maasulussa.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
GE-6107	0,4		14,15	3,27	2,64	0,61	
M1+10H	0,4	gG 16 A, 5 s.	0,26	0,06	0,18	0,04	Kyllä
M101+100H	0,4	gG 125 A, 5 s.	5,06	1,17	1,89	0,44	Kyllä
M101+200H	0,4	gG 400 A, 5 s.	5,15	1,19	1,90	0,44	Ei (10 s)
M2+100H	0,4	gG 200 A, 5 s.	14,94	3,45	2,67	0,62	Kyllä
M2+1100RH	0,4	gG 80 A, 5 s.	13,47	3,11	2,64	0,61	Kyllä
M2+HR100	0,4	gG 80 A, 5 s.	13,51	3,12	2,64	0,61	Kyllä
M28+100H	0,4	-	0,88	0,20	0,57	0,13	
M28+200H	0,4	-	0,85	0,20	0,56	0,13	
M28+300H	0,4	gG 40 A, 5 s.	0,88	0,20	0,58	0,13	Kyllä
M28+V	0,4	gG 80 A, 5 s.	0,90	0,21	0,59	0,14	Kyllä
M33+100H	0,4	gG 50 A, 5 s.	0,25	0,06	0,17	0,04	Kyllä
M78+100H	0,4	gG 100 A, 5 s.	5,10	1,18	1,84	0,42	Kyllä
M81+500H	0,4	gG 125 A, 5 s.	3,93	0,91	1,72	0,40	Kyllä
M81+9200RH	0,4	gG 80 A, 5 s.	3,79	0,88	1,70	0,39	Kyllä
M89+100H	0,4	gG 125 A, 5 s.	4,03	0,93	1,71	0,40	Kyllä
M89+100RH	0,4	-	3,83	0,88	1,68	0,39	
M89+RH200	0,4	-	3,63	0,84	1,65	0,38	
PKV_01	0,4	gG 80 A, 5 s.	6,15	1,42	2,30	0,53	Kyllä

Taulukosta 5.11 nähdään, että muuntamo M101:n kiskolla M101+200H suurimman sulakkeen oikosulkusuojaus yksivaiheisessa maasulussa ei toteudu viidessä sekunnissa. GG 400 A -sulakkeella suojaus toteutuu 10 sekunnissa. Kiskon seuraavaksi suurin sulake on gG 250 A, jolla suojaus toteutuu vaaditussa toiminta-ajassa. Kuvan 5.3 perusteella suurin mahdollinen kiskolle M101+200H asennettava sulake, jolla suojaus toteutuisi vaaditussa toiminta-ajassa, on gG 300 A -sulake. Mikäli oikosulku tapahtuisi muuntamo M2:n kiskolla M2+100H, johon varavoimageneraattori GE-6107 on kytketty, varavoimageneraattorin automatiikka kytkisi generaattorin irti kyseisestä kiskosta.

Taulukossa 5.12 on esitetty generaattori GE-6107:n syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välisten johto-osuuksien suojauksien toteutuminen varavoimatilanteessa. Suojausten toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirroilla.

Taulukossa 5.12 on esitetty, mistä varavoimakeskusten välisestä johto-osuudesta on kyse. Johto-osuuden suojalaite -sarakeessa on esitetty, mikä suojalaite johto-osuudella on. 3-vaiheinen vikavirta -sarakeessa on esitetty johto-osuudelle asennetun suojalaitteen läpi menevä virta kolmivaiheisessa oikosulussa. Mikäli jollain johto-osuudella on useampi suojalaite, taulukossa on esitetty kummankin suojalaitteen toiminta-aika johto-osuuden vikavirralla.

Taulukko 5.12. Generaattori GE-6107 syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välillä johto-osuuksilla olevien suojalaitteiden toiminta-aika vikavirran mukaan.

Varavoima-keskukselta	Varavoima-keskukselle	Johto-osuuden suojalaite	3-vaiheinen vikavirta I_k [kA]	Toiminta-aika [s]
M2+100H	M2+100G	CEF 63 A	0,24	20
M2+100H	M2+100G	SUOJARELE	9,21	4,0
M2+100H	M2+HR100	gG 200 A	8,92	< 0,1
M2+100H	M2+1100RH	gG 200 A	8,92	< 0,1
M2+100H	M28+V	gG 80 A	2,02	< 0,1
M2+100H	PKV01	gG 125 A	7,55	< 0,1
M2+100G	M78+100G	-		
M2+100G	M101+200H	SUOJARELE	3,55	3,0
M101+200H	M101+100H	gG 400 A	3,53	2,0
M101+200H	M101+100H	SUOJARELE	3,53	3,0
M101+200H	M81+500H	gG 250 A	3,20	0,2
M101+200H	M81+500H	SUOJARELE	3,20	< 0,1
M81+500H	M81+9200RH	gG 125 A	3,16	< 0,1
M28+V	M28+100H	gG 80 A	1,98	< 0,1
M28+V	M28+200H	gG 80 A	1,94	< 0,1
M28+V	M28+300H	gG 250 A	1,99	0,8
M28+V	M33+100H	gG 63 A	0,64	< 0,1
M28+V	M1+10H	gG 80 A	0,54	0,5
M78+100G	M78+100H	CEF 25 A	0,23	< 0,1
M78+100G	M78+100H	SUOJARELE	3,36	< 0,1
M78+100G	M89+100G	-		
M89+100G	M89+100H	CEF 25 A	0,23	< 0,1
M89+100G	M89+100H	SUOJARELE	3,02	0,3
M89+100H	M89+100RH	gG 125 A	2,98	< 0,1
M89+100H	M89+RH200	gG 35 A	2,95	< 0,1

Taulukon 5.12 toiminta-ajat sulakkeille on katsottu kuvien 5.3 ja 5.5 virta-aikakäyristä. Suojareleiden toiminta-ajat on katsottu kyseisen suojareleen laukaisukäyrästä.

Kolmivaiheisen oikosulun vikavirralla lähes jokaisen sulakkeen toiminta-aika on alle 0,1 sekuntia. Taulukon 5.12 arvoista voidaan päätellä, että saarekkeen suojaus ei ole selektiivinen. Sillä esimerkiksi muuntamon M1 kiskon M1+10H tehonsyöttö varavoimatilanteessa tulee varavoimakeskus M28+V:n kautta. Oikosulun tapahtuessa muuntamon M1 kiskolla M1+10H, saattaa ensimmäiseksi laueta varavoimakeskusten M2+100H ja M28+V välissä oleva gG 80 A sulake, sillä sen kautta kulkee kuormituksesta johtuen enemmän virtaa kuin varavoimakeskusten M28+V ja M1+10H välissä olevan gG 80 A sulakkeen läpi. Näin ollen varavoimakeskus M1+10H:lla tapahtuvassa oikosulussa varavoimaverkosta kytkeytyisi irti turhan suuri osa oikosulun seurauksena.

5.7 Generaattorin GE-6109 syöttämä alue

Generaattori GE-6109 sijaitsee muuntamolla M37 ja sillä syötetään varavoimaa TL 3 alueen muuntamoille. Syötettäviä muuntamoita on yhteensä kuusi kappaletta. Muuntamoiden kuormat koostuvat pääosin moottoreista sekä alueen valaistuksesta. Pätötehoon suurin moottori generaattori GE-6109:n syöttämällä alueella on muuntamolta M39

syöttönsä saava moottori GAM-10335 XS, jonka pätöteho on 55 kW ja joka käynnistetään suoraikäynnistyksellä. Muuntamon M37 vieressä olevalla palokunnan alueella sijaitsee myös varavoimageneraattori GE-6110, jolla hoidetaan alueen hätäkuulutusjärjestelmän tehonsyöttö varavoimatilanteessa. Hätäkuulutusjärjestelmän tehonsyöttö ja generaattori GE-6110 on kuitenkin jätetty pois varavoimaverkon tarkasteluista, koska GE-6110 ei ole galvaanisesti yhteydessä jalostamon muuhun varavoimaverkkoon.

Jänniterele kytkee generaattori GE-6109:n kiinni muuntamon M37 varavoimakiskoon, kun muuntamo M37:n kiskon M37+100H jännite on pysynyt alle 70 %:ssa riittävän kauan ja dieselgeneraattori on saavuttanut nimellisen pyörimisnopeuden. Samalla automaattinen syötönvaihto aukaisee yhteyden kennolle M37+100F, josta normaalitilanteessa tulee syöttö muuntamon M37+100H kiskolla oleville kojeille.

Generaattori GE-6109:n nimellisteho on 325 kVA ja sen tehokerroin on 0,8. Pitkäaikaisessa käytössä generaattorilta saatava pätöteho on 260 kW. Generaattoria voidaan kuormittaa hetkellisesti nimellistehoa suuremmalla kuormalla, mutta tehotasapainoa tutkittaessa NEPLAN:ssa on käytetty generaattorin nimellistehoa.

Generaattori GE-6109:n syöttämän alueen muuntamoista ei ollut saatavissa virtamittaustietoja, joten kaikki alueella olevat kuormat ovat arvioita. Arviot on tehty sähkönkäyttöluetteloiden ja jakelukaaviokuvien perusteilla. Kuormituksia mallinnettaessa on oletettu, että kaikki moottorit toimivat täydellä teholla ja kaikki varavoimaverkkoon liitetyt kuormat ovat kytkettyinä päälle.

5.7.1 Generaattori GE-6109 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema

Muuntamo M37 sijaitsee TL 3:n alueella keskuskonttoria vastapäätä. TL 3 alueen tehonsyöttö suoritetaan 400 voltin jännitetasossa. Muuntamolta M37 lähtee 10 kV:n yhteys muuntamoille M15 sekä M50, mutta normaalissa kytkentätilanteessa generaattoria GE-6109 ei ole yhdistetty muuntamon M37 10 kV:n kiskoon.

Taulukossa 5.13 on esitetty NEPLAN:sta saadut tehotasapainon laskentatulokset generaattori GE-6109:n syöttämälle saarekkeelle varavoimakäytössä.

Taulukko 5.13. Generaattori GE-6109 syöttämän saarekkeen tehotasapaino.

Saareke		Tuotettu teho		Kulutettu teho			
Generaattori	Nimellisteho [kW]	P_{Gen} [kW]	Q_{Gen} [kVar]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]	P_{Loss} [kW]	Q_{Loss} [kVar]
GE-6109	260,00	247,37	104,15	244,30	102,93	3,95	5,17

Taulukossa 5.13 on esitetty, mihin generaattori GE-6109:n tuottama pätö- ja loisteho kuluu. Saarekkeen muuntamoilla olevat kuormat kuluttavat pätötehoa yhteensä 247,37 kW ja loistehoa 104,15 kVar. GE-6109:n syöttämän saarekkeen johdoilla ja muuntajissa tapahtuvat pätö- ja loistehohäviöt ovat 3,95 kW ja 5,17 kVar. NEPLAN:n mallissa on mallinnettu vain muuntamoiden kiskojen väliset johto-osuudet, joten todel-

lisuudessa johdoilla tapahtuvat häviöt ovat suuremmat kuin taulukon 5.13 P_{Loss} - ja Q_{Loss} -sarakkeissa ilmoitetut arvot.

Taulukon 5.13 tuotettu teho -sarakkeista huomataan, että generaattori GE-6109 toimii noin 95 %:n käyttöasteella. Saarekkeen kuormien tehot ovat arvioita, mutta arvioiden perusteella tehtyjen laskentatulosten pohjalta voidaan päätellä, että generaattori GE-6109:n syöttämään varavoimaverkkoon ei voi enää lisätä uusia kuormia. Maksimikuormitustilanteessa oikosulkumoottoreiden käynnistäminen voi aiheuttaa verkossa hetkellisesti suuren jännitteenaleneman.

Taulukossa 5.14 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset solmupisteiden jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattori GE-6109:n syöttämällä alueella varavoimakäytössä. Solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä solmupisteen tuloksista on kyse.

Taulukko 5.14. Generaattorin GE-6109:n sekä varavoimakiskojen jännitteet, jännitteiden kulmat ja tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]
GE-6109	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00
HUOLTORAKENNUS_KESKUS_VPK	0,40	99,44	0,00	0,00	0,00
M37_PKV	0,40	99,46	0,00	0,00	0,00
M37+100H	0,40	99,46	0,00	2,00	0,40
M37+10H	0,40	99,44	0,00	15,00	3,00
M37+1100H	0,40	99,44	0,00	2,00	0,40
M37+20H	0,40	99,41	0,00	75,10	44,50
M38+100H	0,39	96,69	0,40	20,20	10,70
M39+100H	0,39	98,39	-0,10	67,00	30,60
M46+100H	0,40	99,05	0,00	10,00	2,00
M83+100H	0,40	98,81	0,00	18,00	3,70
M84+100H	0,40	98,89	-0,10	5,00	1,50
M84+RH100	0,40	98,84	-0,10	20,00	4,10
M84+RH200	0,40	98,85	-0,10	10,00	2,00

Taulukon 5.14 tulosten pohjalta, suurimmat kuormat generaattori GE-6109:n syöttämällä alueella ovat muuntamoilla M37, M39 ja M84. Muuntamoilla M37 ja M39 kuormat koostuvat varavoimaverkkoon liitetyistä moottoreista. Muuntamon M84 kuormat koostuvat pääosin muuntamon sekä lähialueen valaistuksesta sekä pistorasiaryhmistä.

Porvoon jalostamon varavoimaverkossa suurin sallittu jännitteenalenema varavoimaverkossa on 2 %:a. Ainoastaan muuntamon M38 varavoimakiskon M38+100H jännite on alle sallitun rajan. Muuten saarekkeen varavoimakeskusten jännitteet ovat sallituissa rajoissa.

5.7.2 Generaattori GE-6109 syöttämän alueen vikatarkastelu

Generaattori GE-6109 syöttämän alueen vikatarkastelussa on tutkittu, toteutuuko virtapiirien oikosulkusuojauskset vaadituissa toiminta-ajoissa varavoimakäytössä. Pienjänniteverkosta on tutkittu jokaisen varavoimaverkkoon liitetyn kiskon suurimman sulakkeen

toiminta yksivaiheisen oikosulun vikavirralla. Varavoimakeskusten kiskojen välisten johto-osuuksien suojauksien toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirralla.

Taulukossa 5.15 on esitetty generaattori GE-6109 syöttämän alueen pienjänniteverkon eri vikapaikkojen alkutilan oikosulkuvirta I_k'' ja oikosulkuteho S_k'' sekä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k ja oikosulkuteho S_k yksivaiheisessa maasulussa. Sarakkeissa on ilmoitettu myös vikapaikka, vikapaikan nimellisjännite U_n , vikapaikan nimellisvirraltaan suurin suojalaite sekä siltä vaadittava toiminta-aika.

Taulukko 5.15. GE-6109 syöttämän saarekkeen pienjännitesolmupisteiden oikosulkuvirrat ja -tehot sekä suojauksien tarkastelu 1-vaiheisen maasulun vikavirroilla.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
GE-6109	0,4		4,32	1,00	0,84	0,19	
HUOLTORAKENNUS_PKV		gG 25 A, 5 s.	1,00	0,23	0,55	0,13	Kyllä
PALOKUNTA_PKV	0,4	-	2,55	0,59	0,78	0,18	
M37+100H	0,4	gG 630 A, 5 s.	4,24	0,98	0,84	0,19	Ei > 100 s.
M37+10H	0,4	gG 25 A, 5 s.	4,13	0,95	0,83	0,19	Kyllä
M37+1100H	0,4	gG 80 A, 5 s.	3,46	0,80	0,82	0,19	Kyllä
M37+20H	0,4	gG 80 A, 5 s.	4,20	0,97	0,83	0,19	Kyllä
M38+100H	0,4	gG 63 A, 5 s.	0,60	0,14	0,37	0,08	Kyllä
M39+100H	0,4	gG 125 A, 5 s.	2,87	0,66	0,78	0,18	Kyllä
M46+100H	0,4	gG 80 A, 5 s.	1,43	0,33	0,64	0,15	Kyllä
M83+100H	0,4	gG 50 A, 5 s.	1,66	0,38	0,69	0,16	Kyllä
M84+100H	0,4	gG 80 A, 5 s.	2,56	0,59	0,77	0,18	Kyllä
M84+RH100	0,4	gG 50 A, 5 s.	2,41	0,56	0,76	0,18	Kyllä
M84+RH200	0,4	gG 16 A, 0,4 s.	2,27	0,52	0,75	0,17	Kyllä

Taulukosta 5.15 nähdään, että muuntamo M37:n kiskolla M37+100H nimellisvirraltaan suurimman sulakkeen oikosulkusuojaus yksivaiheisessa maasulussa ei toteutuisi viides-
sä sekunnissa. GG 630 A -sulakkeella suojauksen toteutumiseen menisi yli 100 sekun-
tia. Kuvan 5.3 perusteella suurin mahdollinen kiskolle M37+100H asennettava sulake,
jolla suojaus toteutuisi vaaditussa toiminta-ajassa, on gG 200 A sulake. Mikäli oikosul-
ku tapahtuisi muuntamo M37:n kiskolla M37+100H, johon varavoimageneraattori
GE-6109 on kytketty, varavoimageneraattorin automatiikka kytkisi generaattorin irti
kyseisestä kiskosta.

Taulukossa 5.16 on esitetty generaattori GE-6106:n syöttämän saarekkeen varavoi-
makeskusten välisten johto-osuuksien suojauksien toteutuminen varavoimatilanteessa.
Suojausten toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirroilla.

Taulukossa 5.16 on esitetty, mistä varavoimakeskusten välisestä johto-osuudesta on
kyse. Johto-osuuden suojalaite -sarakeessa on esitetty, mikä suojalaite johto-osuudella
on. 3-vaiheinen vikavirta -sarakeessa on esitetty johto-osuudelle asennetun suojalait-
teen läpi menevä virta kolmivaiheisessa oikosulussa.

Taulukko 5.16. Generaattori GE-6109 syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välillä johto-osuuksilla olevien suojalaitteiden toiminta-aika vikavirran mukaan.

Varavoima-keskukselta	Varavoima-keskukselle	Johto-osuuden suojalaite	3-vaiheinen vikavirta I_k [kA]	Toiminta-aika [s]
M37+100H	M37+10H	gG 400 A	3,17	2,5
M37+100H	M37+20H	gG 630 A	3,19	20
M37+100H	M37+1100H	gG 125 A	3,08	< 0,1
M37+100H	PALOKUNTA_PKV	gG 250 A	2,93	0,2
M37+100H	M38+100H	gG 160 A	1,25	0,2
M37+100H	M39+100H	gG 500 A	2,72	10
M37+100H	M46+100H	gG 250 A	2,19	0,5
M37+100H	M83+100H	aM 125 A	2,42	< 0,1
M37+100H	M84+100H	SUOJARELE	2,65	< 0,1
M37+20H	HUOLTORAKENNUS_PKV	-	1,71	
M84+100H	M84+RH100	gG 80 A	2,61	< 0,1
M84+100H	M84+RH100	SUOJARELE	2,61	< 0,1
M84+100H	M84+RH200	gG 40 A	2,59	< 0,1

Taulukon 5.16 toiminta-ajat sulakkeille on katsottu kuvien 5.3, 5.4 ja 5.5 virta-aikakäyristä. Suojareleiden toiminta-ajat on katsottu kyseisen suojareleen laukaisukäyrästä.

Liitteessä kaksi on esitetty generaattori GE-6109:n jakelukaavio. Vian tapahtuessa esimerkiksi varavoimakeskuksessa M84+RH100, varavoimakeskusten M37+100H ja M84+100H välinen suojaus laukeaisi alle 0,1 sekunnissa. Samassa ajassa laukeaisi myös varavoimakeskusten M84+100H ja M84+RH100 välinen suojaus. Taulukon 5.16 tuloksista voidaan päätellä, että saarekkeen selektiivisyyttä vikatilanteissa pitäisi tutkia tarkemmin.

5.8 Voimalaitoksen muuntamon M50 syöttämä alue

Muuntamo M50 sijaitsee Porvoon jalostamon voimalaitoksella ja sieltä on 10 kV:n varavoimayhteys 120 Ω :n maadoitusvastuksen kautta muuntamon M37 10 kV:n varavoimakiskoon M37+100G. Voimalaitoksen pääasiallinen tehtävä on tuottaa höyryä Porvoon jalostamoalueen prosesseille, sen lisäksi voimalaitoksella voidaan tuottaa sähköä jalostamon tarpeisiin. Muuntamolta M50 on varavoimayhteys 16 varavoimaverkon muuntamoon.

Porvoon jalostamon voimalaitoksella on vastapaine- ja lauhdegeneraattorit sekä kaksi varavoimageneraattoria. Vastapaine- ja lauhdegeneraattoreilla voidaan tuottaa sähköä Porvoon jalostamon alueelle. Dieselgeneraattoreilla GH-14010 ja GH-14020 voidaan puolestaan tuottaa sähköä voimalaitoksen omaan käyttöön. Varavoimatilanteissa dieselgeneraattoreilla hoidetaan voimalaitoksen turbiinien turvallinen alasajo sekä turvalliset työskentelyolosuhteet voimalaitoksella, jalostamon varavoimaverkkoon niillä ei kuitenkaan voi syöttää varavoimatehoa, vaan varavoimaverkon kuormien tarvitsema teho tuotetaan vastapaine- ja lauhdegeneraattoreilla.

Nykyisellä varavoimaverkon kytkennällä säiliö- ja satama-alueen tehonsyöttö on ajateltu tulevan muuntamon M37 kautta Porvoon jalostamon voimalaitoksen muuntamolta M50. Sähkön halvan hinnan takia Porvoon jalostamon voimalaitoksella ei kuitenkaan ole tuotettu viime aikoina sähköä, vaan voimalaitoksella on valmistettu vain höyryä jalostamon prosessien tarpeisiin. Mikäli Porvoon jalostamon alueella olisi ollut laaja sähkökatko, nykyisellä varavoimaverkon kytkentätilanteella suuri osa säiliö- ja satama-alueella olisi jäänyt ilman varavoimaa, koska voimalaitoksen vastapaine- ja lauhdegeneraattorit ovat olleet poissa käytössä.

110 kV:n verkon sähkökatkoissa, jotka tapahtuvat Porvoon jalostamon voimalaitoksen ympäristössä, voimalaitoksen varavoimageneraattorit käynnistyvät automaattisesti ja niillä aletaan syöttää tehoa kattilakeskuksille. Mikäli voimalaitoksella tuotettaisiin sähköä, pitkäaikaisissa sähkökatkoissa lauhde- ja vastapainegeneraattorit kuitenkin kytkeytyisivät luultavasti irti verkosta, koska esimerkiksi voimalaitoksen syöttövesipumppuja ei ole kytketty varavoiman perään.

Voimalaitoksen merkitys sähkön tuotannossa on ollut ennen merkittävämpi, kun Porvoon jalostamon sähkötehon tarve on ollut pienempi. Nykyään jalostamon käyttämä sähkö ostetaan pääosin valtakunnan verkosta. Voimalaitoksen toiminta ei saisi kuitenkaan vaikuttaa jalostamon alueen varavoimaverkon toimintaan, vaan jalostamon alueella pitäisi olla aina käytettävissä varavoimaa.

Muuntamolta M50 syötetään varavoimaa muuntamoille M5, M13, M14, M15, M16, M18, M22, M31, M37, M41, M42, M43, M48, M88 ja suunnitteilla oleville muuntamoille M98 ja M130. Edellä mainituista muuntamoista syötetään satama-alueen varavoimaverkon kuormia sekä suurinta osaa säiliöalueen varavoimaverkon kuormista. Mikäli voimalaitoksen lauhde- ja vastapainegeneraattorit syöttäisivät varavoimaa edellä mainituille muuntamoille, alueiden tehonjaossa, vikavirroissa tai jännitteen laadussa ei olisi mitään ongelmia. Nykyisellään muuntamolta M50 varavoimasyöttönsä saavat muuntamot ovat kuitenkin kokonaan ilman varavoimaa ja siksi alueen tehonsyöttöä pitää kehittää.

5.9 Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämät alueet

Generaattorit GE-6111 ja GE-6112 sijaitsevat muuntamolla M120 ja niillä syötetään varavoimaa TL 4 alueen varavoimaverkkoon. Generaattorit toimivat muista varavoimageneraattoreista poiketen 690 voltin nimellijännitteellä. Liitteessä neljä on esitetty generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämä varavoimaverkko NEPLAN:iin mallinnettuna.

Muuntamon M120 varavoimageneraattoreihin kytketyt kuormat koostuvat pääosin moottoreista sekä alueen valaistuksesta. Suurin moottori, generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämässä verkossa, on moottori GAM-75003S, jonka nimellispäteho on 200 kW ja joka käynnistetään suorakäynnistyksellä.

Jänniterele kytkee generaattorin GE-6111 kiinni muuntamon M120 kiskoon M120+100HE, kun kiskon jännite pysyy alle 70 %:ssa nimellisarvosta riittävän kauan ja dieselgeneraattori on saavuttanut nimellisen pyörimisnopeuden. Samalla automaattinen syötönvaihto aukaisee yhteyden kennolle M120+100E, josta normaalitilanteessa tulee syöttö muuntamon M120 kiskossa M120+100HE oleville kojeille.

Generaattori GE-6112 kytkeytyy kiinni muuntamon M120 kiskoon M120+200HE, kun kiskon jännite pysyy alle 70 %:ssa nimellisarvosta riittävän kauan ja dieselgeneraattori on saavuttanut nimellisen pyörimisnopeuden. Samalla automaattinen syötönvaihto aukaisee yhteyden kennolle M120+200E, josta normaalitilanteessa tulee syöttö muuntamon M120 kiskossa M120+200HE oleville kojeille.

Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 nimellistehot ovat 2500 kVA ja niiden tehokerroin on 0,8. Pitkäaikaisessa käytössä generaattoreilta saatava pätöteho on yhteensä 4000 kW. Generaattoreita voidaan kuormittaa hetkellisesti nimellistehoa suuremmalla kuormalla, mutta tehotasapainoa tutkittaessa NEPLAN:ssa on käytetty generaattoreiden nimellistehoa.

Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämän alueen muuntamoista ei ollut saatavissa virtamittaustietoja, joten kaikki alueella olevat kuormat ovat arvioita. Arviot on tehty sähkönkäyttöluetteloiden ja jakelukaaviokuvien perusteilla. Kuormituksia mallinnettaessa on oletettu, että kaikki moottorit toimivat täydellä teholla ja kaikki varavoimaverkkoon liitetyt kuormat ovat kytkettyinä päälle.

5.9.1 Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 tehotasapaino ja jännitteenalenema

Generaattorit GE-6111 ja GE-6112 sijaitsevat muuntamolla M120 ja niillä hoidetaan TL 4 alueen tehonsyöttö varavoimatilanteessa. Muuntamo M120:n varavoimakuormien lisäksi generaattoreilla syötetään muuntamo M121:n sekä tukitilojen IA244 ja IA245 varavoimakuormia. TL 4 alueen varavoimaverkko ei ole yhteydessä jalostamoalueen muuhun varavoimaverkkoon, vaan generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämät alueet toimivat omina saarekkeinaan. Taulukossa 5.17 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämille saarekkeille varavoimakäytössä. Liitteessä viisi on esitetty kaikki NEPLAN:sta saadut laskentatulokset generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämille saarekkeille varavoimakäytössä.

Taulukko 5.17. Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämien saarekkeiden tehotasapaino.

Saareke		Tuotettu teho		Kulutettu teho			
Generaattori	Nimellisteho [kW]	P _{Gen} [kW]	Q _{Gen} [kVar]	P _{Load} [kW]	Q _{Load} [kVar]	P _{Loss} [kW]	Q _{Loss} [kVar]
GE-6111	2000,00	1502,00	710,00	1490,00	683,00	12,00	26,00
GE-6112	2000,00	1513,00	705,00	1494,00	663,00	20,00	43,00

Taulukossa 5.17 on esitetty, mihin generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 tuottama pätö- ja loisteho kuluvat. GE-6111 syöttämän saarekkeen muuntamoilla olevat kuormat kuluttavat pätötehoa yhteensä 1490 kW ja loistehoa 683 kVar.

GE-6112 syöttämän saarekkeen muuntamoilla olevat kuormat kuluttavat pätötehoa yhteensä 1494 kW ja loistehoa 663 kVar. Generaattoreiden syöttämien saarekkeiden johdoilla ja muuntajissa tapahtuvat pätö- ja loistehohäviöt ovat yhteensä 32 kW ja 69 kVar. NEPLAN:n mallissa on mallinnettu vain varavoimakeskusten kiskojen väliset johto-osuudet, joten todellisuudessa johdoilla tapahtuvat häviöt ovat suuremmat kuin taulukon 5.17 P_{Loss} - ja Q_{Loss} -sarakkeissa ilmoitetut arvot.

Taulukon 5.17 tuotettu teho -sarakkeista huomataan, että generaattorit toimivat noin 75 % kuormituksessa. Suuren moottorikuorman takia generaattoreiden syöttämään varavoimaverkkoon ei kuitenkaan voi kytkeä paljon uutta varavoimakuormaa, sillä muuten moottoreiden luotettava käyttö varavoimatilanteessa saattaa vaarantua.

Taulukossa 5.18 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset solmupisteiden jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattori GE-6111:n syöttämällä alueella varavoimakäytössä. Solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä solmupisteen tuloksista on kyse.

Taulukko 5.18. Generaattorin GE-6111:n sekä varavoimakiskojen jännitteet, jännitteiden kulmat sekä tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]
GE-6111	0,69	100,00	0,00	0,00	0,00
100HE	0,69	99,35	-0,40	979,30	474,10
1100HE	0,68	98,93	-0,40	282,70	142,90
120RH200	0,39	97,59	-1,10	10,00	2,90
120RH600	0,38	94,36	-1,10	50,00	14,60
244H100	0,39	97,38	-1,60	86,80	25,30
244RH100	0,39	97,11	-1,70	40,00	11,70
300H	0,39	98,22	-1,10	40,00	11,70
SK404	0,39	97,34	-1,60	1,00	0,30

Taulukosta 5.18 huomataan, että generaattorin GE-6111 nimellisjännite on 690 V, samoin kuin on generaattorin GE-6112. TL 4 alueen varavoimaverkossa käytetään sekä 690 V:n että 400 V:n jännitetasoa.

Solmupisteessä 120RH600 jännite on prosentuaalisesti matalin generaattori GE-6111:n syöttämässä verkossa. Suurin sallittu jännitteenalenema Porvoon jalostamon varavoimaverkossa on 2 %:a nimellisarvosta, joten ainoastaan solmupisteissä 100HE, 1100HE ja 300H jännite on sallituissa rajoissa.

Taulukossa 5.19 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset solmupisteiden jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattori GE-6111:n syöttämällä alueella varavoimakäytössä. Solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä solmupisteen tuloksista on kyse.

Taulukko 5.19. Generaattorin GE-6112:n sekä varavoimakiskojen jännitteet, jännitteiden kulmat sekä tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P _{Load} [kW]	Q _{Load} [kVar]
GE-6112	0,69	100,00	0,00	0,00	0,00
200HE	0,69	99,35	-0,40	762,00	386,00
2100HE	0,68	98,95	-0,40	260,00	140,40
120RH100	0,39	97,16	-1,70	15,00	3,00
120RH500	0,37	92,68	-3,30	150,00	43,80
244H200	0,39	98,05	-1,10	86,80	25,30
400H	0,39	96,84	-2,00	40,00	11,70
500H	0,39	97,40	-1,60	160,00	46,70
ANALYSAATTORISUOJA IA-270	0,39	96,28	-1,90	10,00	2,90
ANALYSAATTORISUOJA IA-271	0,38	96,08	-1,90	10,00	2,90

Generaattori GE-6112:n syöttämässä verkossa jännite ei ole sallituissa rajoissa solmupisteissä 120RH100, 120RH500, 400H, 500H ja analysaattorisuojissa IA-270 ja IA-271. Muissa saarekkeen solmupisteissä jännite on sallituissa rajoissa.

5.9.2 Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämien alueiden vikavirtatarkastelu

Saarekkeiden vikavirtatarkasteluissa on tutkittu, toteutuuko virtapiirien oikosulkusuojaus riittävän nopeasti. Taulukoissa 5.20 ja 5.21 on esitetty generaattorien GE-6111 ja GE-6112 syöttämien alueiden pienjänniteverkkojen eri vikapaikkojen alkutilan oikosulkuvirta I_k'' ja oikosulkuteho S_k'' sekä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k ja oikosulkuteho S_k yksivaiheisessa maasulussa. Sarakkeissa on ilmoitettu myös vikapaikka, vikapaikan nimellisjännite U_n , vikapaikan nimellisvirraltaan suurin suojalaite sekä siltä vaadittava toiminta-aika.

Taulukko 5.20. GE-6111 syöttämän saarekkeen pienjännitesolmupisteiden oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot sekä suojausien tarkastelu 1-vaiheisen maasulun vikavirroilla.

Vikapaikka	U _n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I _k " [kA]	S _k " [MVA]	I _k [kA]	S _k [MVA]	Suojaus toteutuu
GE-6111	0,69		11,98	4771,20	3,00	1195,00	
100HE	0,69	gG 400 A, 5 s.	11,04	4396,90	2,93	1166,50	Kyllä
1100HE	0,69	gG 125 A, 5 s.	8,94	3561,20	2,78	1107,20	Kyllä
300H	0,4	gG 125 A, 5 s.	8,40	1940,20	4,21	973,20	Kyllä
120RH200	0,4	gG 16 A, 0.4 s.	0,82	189,00	0,59	136,20	Kyllä
120RH600	0,4	-	0,76	175,80	0,55	126,70	Kyllä
244H100	0,4	gG 250 A, 5 s.	6,64	1533,00	3,66	844,50	Kyllä
SK404	0,4	gG 10 A, 0,4 s.	1,36	313,90	0,98	225,10	Kyllä
244RH100	0,4	gG 80 A, 5 s.	4,38	1012,50	2,78	641,60	Kyllä

Taulukon 5.20 perusteella generaattori GE-6111:n syöttämässä varavoimaverkossa ei ole ongelmia oikosulkusuojausien kanssa varavoimakäytössä.

Taulukossa 5.21 on esitetty generaattori GE-6112:n syöttämän saarekkeen vikapaikkojen oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot yksivaiheisessa maasulussa varavoimakäytössä.

Taulukko 5.21. GE-6112 syöttämän saarekkeen pienjännitesolmupisteiden oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot sekä suojauksien tarkastelu 1-vaiheisen maasulun vikavirroilla.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
GE-6112	0,69		11,59	4616,10	3,00	1195,00	
200HE	0,69	gG 400 A, 5 s.	10,70	4260,50	2,93	1166,50	Kyllä
2100HE	0,69	gG 125 A, 5 s.	8,73	3479,50	2,78	1107,20	Kyllä
400H	0,4	gG 125 A, 5 s.	8,18	1888,20	4,18	965,70	Kyllä
120RH500	0,4	gG 80 A, 5 s.	2,10	485,80	1,48	342,40	Kyllä
500H	0,4	gG 250 A, 5 s.	8,24	1902,00	4,20	970,40	Kyllä
244H200	0,4	gG 160 A, 5 s.	6,84	1579,50	3,76	868,00	Kyllä
120RH100	0,4	gG 80 A, 5 s.	2,95	680,30	2,01	464,90	Kyllä
ANAL.SUOJA IA-271	0,4	-	0,69	159,60	0,50	115,10	
ANAL.SUOJA IA-270	0,4	-	0,92	212,90	0,66	153,40	

Taulukosta 5.21 huomataan, että GE-6112 syöttämän saarekkeen oikosulkusuojaukset toimivat vaadituissa toiminta-ajoissa.

Taulukoissa 5.22 ja 5.23 on esitetty generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämien saarekkeiden varavoimakeskusten välisten johto-osuuksien suojauksien toteutuminen varavoimatilanteessa. Suojauksen toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirroilla.

Taulukoissa 5.22 ja 5.23 on esitetty, mistä varavoimakeskusten välisestä johto-osuudesta on kyse. Johto-osuuden suojalaite -sarakeessa on esitetty, mikä suojalaite johto-osuudella on. 3-vaiheinen vikavirta -sarakeessa on esitetty johto-osuudelle asennetun suojalaitteen läpi menevä virta kolmivaiheisessa oikosulussa.

Taulukko 5.22. Generaattori GE-6111 syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välillä johto-osuuksilla olevien suojalaitteiden toiminta-aika vikavirran mukaan.

Varavoima-keskukselta	Varavoima-keskukselle	Johto-osuuden suojalaite	3-vaiheinen vikavirta I_k [kA]	Toiminta-aika [s]
GE-6111	100HE	SUOJARELE	7,66	0,2
100HE	1100HE	gG 400 A	7,12	0,8
100HE	IA244+T41M	SUOJARELE	6,07	0,2
IA244+T41M	244H100	SUOJARELE	4,85	0,1
100HE	M120+T43M	SUOJARELE	6,63	0,2
M120+T43M	300H	SUOJARELE	5,81	0,1
244H100	244RH100	-	4,05	
244H100	SK404	-	2,84	
300H	120RH200	gG 40 A	2,14	< 0,1
300H	120RH600	gG 50 A	1,82	< 0,1

Taulukko 5.23. Generaattori GE-6112 syöttämän saarekkeen varavoimakeskusten välillä johto-osuuksilla olevien suojalaitteiden toiminta-aika vikavirran mukaan.

Varavoima- keskukselta	Varavoima- keskukselle	Johto-osuuden suojauslaite	3-vaiheinen vikavirta I_k [kA]	Toiminta- aika [s]
GE-6112	200HE	SUOJARELE	7,66	0,2
200HE	IA244+T42M	SUOJARELE	6,07	0,2
200HE	M120+T44M	SUOJARELE	6,63	0,2
200HE	2100HE	gG 400 A	7,12	0,8
200HE	M120+T45M	SUOJARELE	6,63	0,2
400H	120RH500	gG 125 A	2,96	< 0,1
400H	ANAL.SUOJA IA-271	-	1,86	
400H	ANAL.SUOJA IA-270	-	2,34	
500H	120RH100	gG 250 A	3,62	< 0,1
M120+T44M	400H	SUOJARELE	5,76	0,2
IA244+T42M	244H200	SUOJARELE	5,00	0,1
M120+T45M	500H	SUOJARELE	5,80	0,1

Taulukoiden 5.22 ja 5.23 toiminta-ajat sulakkeille on katsottu kuvan 5.3 virta-aikakäyristä. Suojareleiden toiminta-ajat on katsottu kyseisen suojareleen laukaisukäyrästä.

Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämissä saarekkeissa ei ole NEPLAN:sta saatujen laskentatulosten perusteella ongelmia. TL 4 alueen varavoimaverkko on rakennettu vuonna 2005, joten suojausten oletettiin olevan kunnossa.

5.10 Generaattorin GE-6113 syöttämä alue

Generaattori GE-6113 sijaitsee muuntamolla M80 ja sillä syötetään varavoimaa muuntamo M80:n varavoimakiskoon kytketyille moottoreille ja muille varavoimakuormille sekä suunnitteilla olevan muuntamo M111:n varavoimakuormille. Syötettäviä muuntamoita on siis tulevaisuudessa kaksi kappaletta. Pätöteholtaan suurin moottori generaattori GE-6113:n syöttämällä alueella on, ja tulee olemaan, muuntamolta M80 syöttönsä saava moottori GAM-3520S, jonka pätöteho on 132 kW ja joka käynnistetään suora-käynnistyksellä.

Jänniterele kytkee generaattori GE-6113:n kiinni muuntamon M80 varavoimakiskoon, kun muuntamon M80 kiskon M80+100H jännite on pysynyt alle 70 %:ssa riittävän kauan ja dieselgeneraattori on saavuttanut nimellisen pyörimisnopeuden. Samalla automaattinen syötönvaihto aukaisee yhteyden kennolle M80+100F, josta normaalilanteessa tulee syöttö muuntamon M80+100H kiskolla oleville kojeille.

Generaattori GE-6113:n nimellisteho on 1250 kVA ja sen tehokerroin on 0,8. Pitkäaikaisessa käytössä generaattorilta saatava pätöteho on 1000 kW. Generaattoria voidaan kuormittaa hetkellisesti nimellistehoa suuremmalla kuormalla, mutta tehotasapainoa tutkittaessa NEPLAN:ssa on käytetty generaattorin nimellistehoa.

Generaattori GE-6113:n syöttämän alueen varavoimakeskuksista ei ollut saatavissa virtamittaustietoja, joten kaikki alueella olevat kuormat ovat arvioita. Arviot on tehty sähkönkäyttöluetteloiden ja jakelukaaviokuvien perusteilla. Kuormituksia mallinnetta-

essa on oletettu, että kaikki moottorit toimivat täydellä teholla ja kaikki olemassa olevat ja suunnitteilla olevat varavoimaverkkoon liitetyt kuormat ovat kytkettyinä päälle.

5.10.1 Generaattori GE-6113 syöttämän alueen tehotasapaino ja jännitteenalenema

Generaattori GE-6113:n syöttämässä verkossa on moottorikuormaa yhteensä noin 200 kW ja muuta kuormaa noin 50 kW. Suurin moottori, generaattori GE-6113:n syöttämässä varavoimaverkossa on nimellisteholtaan 132 kW ja nimellisvirraltaan 228 A. Oikosulkumoottori voi ottaa käynnistyksessä kuusi kertaa nimellisvirran suuruisen virran, joten varavoimageneraattori GE-6113 on ylimitoitettu sen syöttämien kuormien tehontarpeeseen nähden, jotta moottoreiden käynnistyksessä verkossa ei tapahtuisi suuria jännitteen laadun muutoksia.

Taulukossa 5.24 on esitetty NEPLAN:sta saadut tehotasapainon laskentatulokset generaattori GE-6113:n syöttämälle saarekkeelle varavoimakäytössä.

Taulukko 5.24. Generaattori GE-6113 syöttämän saarekkeen tehotasapaino.

Saareke		Tuotettu teho		Kulutettu teho			
Generaattori	Nimellisteho [kW]	P_{Gen} [kW]	Q_{Gen} [kVar]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]	P_{Loss} [kW]	Q_{Loss} [kVar]
GE-6113	1000,00	253,11	116,96	252,30	120,51	0,81	4,00

Taulukossa 5.24 on esitetty, mihin generaattori GE-6113:n tuottama pätö- ja loisteho kuluu. Saarekkeen varavoimakeskuksissa olevat kuormat kuluttavat pätötehoa yhteensä 252,3 kW ja loistehoa 120,51 kVar.

GE-6113:n syöttämän saarekkeen johdoilla ja muuntajissa tapahtuvat pätö- ja loistehohäviöt ovat 0,81 kW ja 4,00 kVar. NEPLAN:n mallissa on mallinnettu vain varavoimakeskusten kiskojen väliset johto-osuudet, joten todellisuudessa johdoilla tapahtuvat häviöt ovat suuremmat kuin taulukon 5.24 P_{Loss} - ja Q_{Loss} -sarakeissa ilmoitetut arvot.

Taulukon 5.24 tuotettu teho -sarakeista huomataan, että generaattori GE-6113 toimii noin 25 % kuormituksessa. Suuren moottorikuorman takia generaattori GE-6113:n käyttöaste kannattaa pitää matalana, muuten moottoreiden luotettava käyttö saattaa vaarantua.

Taulukossa 5.25 on esitetty NEPLAN:sta saadut laskentatulokset solmupisteiden jännitteenalenemille, jännitteiden kulmille sekä tehoille generaattori GE-6113:n syöttämällä alueella varavoimatilanteessa. Solmupisteen tunnus -sarake kertoo, minkä solmupisteen tuloksista on kyse.

Taulukko 5.25. Generaattorin GE-6113:n sekä varavoimakiskojen jännitteet, jännitteiden kulmat sekä tehot.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{Load} [kW]	Q_{Load} [kVar]
GE-6113	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00
M80+100H	0,40	99,96	0,00	227,30	115,40
M111+9300RH	0,40	99,89	0,00	25,00	5,10

Taulukossa 5.25 solmupisteen M80+100H kuormat ovat tällä hetkellä ainoat generaattori GE-6113:n syöttämät kuormat. Muuntamo M111 tullaan kytkemään GE-6113:n syöttämään varavoimaverkkoon ja varavoimaverkon mallinnuksessa onkin huomioitu solmupisteen M111+9300RH vaikutus saarekkeen toimintaan. Generaattori GE-6113:n syöttämässä verkossa ei ole ongelmia tehonjaossa tai jännitteenalenemassa.

5.10.2 Generaattori GE-6113 syöttämän alueen vikatarkastelu

Generaattori GE-6113 syöttämän alueen vikatarkastelussa on tutkittu, toteutuuko virtapiirien oikosulkusuojaus vaaditussa toiminta-ajassa varavoimakäytössä. Pienjänniteverkosta on tutkittu kummankin varavoimaverkkoon liitetyn kiskon suurimman sulakkeen toiminta yksivaiheisen oikosulun vikavirralla. Varavoimaverkon kiskojen välisen suojauksen toteutuminen on tutkittu kolmivaiheisen oikosulun vikavirralla.

Taulukossa 5.26 on esitetty generaattori GE-6113 syöttämän alueen pienjänniteverkon eri vikapaikkojen alkutilan oikosulkuvirta I_k'' ja oikosulkuteho S_k'' sekä pysyvän tilan oikosulkuvirta I_k ja oikosulkuteho S_k yksivaiheisessa maasulussa. Sarakkeissa on ilmoitettu myös vikapaikka, vikapaikan nimellisjännite U_n , vikapaikan nimellisvirraltaan suurin suojalaite sekä siltä vaadittava toiminta-aika.

Taulukko 5.26. GE-6113 syöttämän saarekkeen pienjännitesolmupisteiden oikosulkuvirrat ja oikosulkutehot sekä suojauksien tarkastelu 1-vaiheisen maasulun vikavirroilla.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
GE-6113			13,37	3,09	4,38	1,01	
M80+100H	0,4	aM 315 A, 5 s.	13,42	3,10	4,42	1,02	Kyllä
M111+9300RH	0,4	gG 80 A, 5 s.	10,01	2,31	3,96	0,91	Kyllä

Taulukosta 5.26 huomataan, että saarekkeen oikosulkusuojaukset toimivat vaadituissa toiminta-ajoissa. Mikäli oikosulku tapahtuisi muuntamo M80:n kiskolla M80+100H, johon varavoimageneraattori GE-6113 on kytketty, varavoimageneraattorin automatiikka kytkisi generaattorin irti kyseisestä kiskosta.

Taulukossa 5.27 on esitetty varavoimakeskusten M80+100H ja M111+9300RH välisen johto-osuuden suojauksen toteutuminen varavoimatilanteessa. Koska muuntamo M111 ei ole vielä kytketty kiinni muuntamoon M80, taulukossa 5.27 on esitetty suojauksen toteutuminen gG 250 A:n sulakkeella, joka on suurin sulake, joka muuntamo M111 valaistuskeskukseen M111+9300RH voidaan kytkeä. Muuntamon M111 vara-

voimakiskolla M111+9300RH suurin valaistuselähdön sulake on gG 80 A sulake, joten varavoimakeskusten välisen johto-osuuden suojaaminen gG 250 A sulakkeella tuo selektiivisyyttä verkon suojaukseen.

Taulukko 5.27. *M80+100H ja M111+9300RH välisen johto-osuuden suojaaminen gG 250 A sulakkeella.*

Varavoima- keskukselta	Varavoima- keskukselle	Johto-osuuden suojalaite	3-vaiheinen vikavirta I_k [kA]	Toiminta- aika [s]
M80+100H	M111+9300RH	gG 250 A	9,72	< 0,1

Toiminta-aika kolmivaiheisessa oikosulussa gG 250 A sulakkeella on kuvan 5.3 perusteella alle 0,1 sekuntia. Toiminta-aika pysyy alle 0,1 sekunnissa vaikka solmupisteessä M111+9300RH tapahtuisi taulukossa 5.26 ilmoitettu yksivaiheinen maasulku. Generaattori GE-6113:n syöttämässä saarekkeessa ei ole taulukoiden 5.26 ja 5.27 perusteella ongelmia vikavirtojen suojauksessa.

5.11 Saarekkeissa havaittujen puitteiden yhteenveto

Edeltävissä kappaleissa on tutkittu Porvoon jalostamon varavoimaverkon toimintaa varavoimakäytössä. Jalostamon varavoimaverkko koostuu yhteensä yhdeksästä eri varavoimaverkon saarekkeesta. Varavoimaverkkoa tutkittaessa on oletettu, että kaikki varavoimaverkkoon kytketyt laitteet toimivat täydellä teholla ja ne ovat kytkettyinä päälle. Varavoimaverkon muuntajissa, joissa on väliottokytkin, on oletettu, että väliottokytkin on nolla-asennossa.

Generaattoreiden syöttämien alueiden tarkasteluissa on kerrottu aluekohtaisesti mitä puutteita verkosta löytyi. Lukuihin 5.11.1 - 5.11.3 on kerätty yhteisesti kaikki varavoimaverkosta havaitut puutteet. Luvussa kuusi on puolestaan esitetty parannusehdotuksia varavoimaverkosta löydettyihin puutteisiin.

5.11.1 Varavoimaverkon tehotasapaino

Varavoimaverkon generaattoreista osa toimisi varavoimatilanteessa lähes maksimikuormassa ja osa alle 50 %:n kuormassa. Taulukon 5.28 arvojen perusteella voidaan tehdä päätelmä, että varavoimaverkon kuormat eivät ole jakaantuneet tasaisesti varavoimaverkon generaattoreille.

Taulukko 5.28. Porvoon jalostamon varavoimaverkon generaattoreiden kuormitusasteet.

Generaattori	Kuormitusaste
GE-6104	46 %
GE-6105	72 %
GE-6106	63 %
GE-6107	88 %
GE-6109	95 %
GE-6111	75 %
GE-6112	75 %
GE-6113	25 %

Pahin tilanne taulukon 5.28 mukaan on generaattori GE-6109:llä, joka toimisi 95 %:n kuormitusasteella, jos kaikki siihen kytketyt varavoimakuormat olisivat kytkettyinä päälle. GE-6109:n syöttämässä saarekkeessa on esimerkiksi 55 kW:n tehoinen oikosulkumoottori, joka ei välttämättä käynnistyisi, mikäli saarekkeen kaikki muut kuormat olisivat kytkettyinä päälle.

Generaattori GE-6107 toimisi myös lähes 90 %:n kuormitusasteella, joten suurten kuormien kytkeminen sen syöttämään saarekkeeseen varavoimatilanteessa voisi aiheuttaa jännitteen laadussa suuria poikkeamia.

Suuria oikosulkumoottoreita sisältävissä varavoimasaarekkeissa kuormien kytkentäjärjestys vaikuttaa suuresti verkon toimintaan. Nimellisteholtaan suuret moottorit tuleekin kytkeä ensin varavoimaverkkoon, jotta niiden ottama suuri käynnistysvirta ei aiheuttaisi liian suurta rasitusta varavoimageneraattoreille.

Suurin ongelma Porvoon jalostamon varavoimaverkossa on voimalaitoksen muuntamolta M50 tuleva varavoiman syöttö. Mikäli Porvoon jalostamon alueella tapahtuisi pitkäaikainen sähkökatkos 110 kV:n verkossa, kaikki muuntamoon M50 kytketyt varavoimakeskukset jäisivät luultavasti ilman sähköä. Muuntamoon M50:een on kytketty yhteensä 16 varavoimaverkon muuntamoa, joiden yhteenlaskettu varavoimakuorma on noin 110 kW:a.

5.11.2 Varavoimaverkon jännitteenalenema

Porvoon jalostamon varavoimaverkon sähkön laadun tarkastelussa keskityttiin jännitteenaleneman tarkasteluun. Varavoimaverkon varavoimakeskuksissa jännitteen tulee olla 98 % - 105 %:a nimellisjännitteestä. Porvoon jalostamon varavoimaverkkoon ei ole kytketty kompensointilaitteistoja ja varavoimaverkon saarekkeiden mallinnuksessa oletettiin, että muuntajien väliottokytkimet ovat nolla-asennossa ja generaattorit toimivat nimellisjännitteellä, joten mallinnuksessa selvisi, miten paljon jännite laskee varavoimaverkon johdoilla ja muuntajissa. Taulukkoon 5.29 on kerätty varavoimaverkon saarekkeiden solmupisteet, joissa jännite ei ollut sallituissa rajoissa.

Taulukko 5.29. Porvoon jalostamon varavoimaverkon solmupisteet, joissa jännite ei ollut sallituissa rajoissa.

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	Syöttävä generaattori
M19+100H	0,39	96,76	GE-6106
M4+100H	0,38	94,19	GE-6106
M7+100H	0,39	97,93	GE-6106
M7+V	0,39	97,89	GE-6106
M8+100H	0,39	96,74	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,39	96,81	GE-6106
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,39	97,05	GE-6106
M081+500H	0,39	96,28	GE-6107
M1+10H	0,37	92,23	GE-6107
M101+100H	0,39	96,53	GE-6107
M101+200H	0,39	96,55	GE-6107
M28+100H	0,37	92,42	GE-6107
M28+200H	0,37	92,47	GE-6107
M28+300H	0,37	92,51	GE-6107
M28+V	0,37	92,52	GE-6107
M33+100H	0,36	89,52	GE-6107
M78+100H	0,39	97,24	GE-6107
M81+9200RH	0,39	96,27	GE-6107
M89+100H	0,39	97,56	GE-6107
M89+100RH	0,39	97,55	GE-6107
M89+RH200	0,39	97,52	GE-6107
M38+100H	0,39	97,16	GE-6109
120RH200	0,39	97,59	GE-6111
120RH600	0,38	94,36	GE-6111
244H100	0,39	97,38	GE-6111
244RH100	0,39	97,11	GE-6111
SK404	0,39	97,34	GE-6111
120RH100	0,39	97,16	GE-6112
120RH500	0,38	95,38	GE-6112
400H	0,39	96,84	GE-6112
500H	0,39	97,40	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-270	0,39	96,28	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-271	0,38	96,08	GE-6112

Taulukossa 5.29 on yhteensä 33 varavoimaverkon solmupistettä, joissa jännite on liian alhainen varavoimakäytössä. Alhaisin jännite on muuntamon M33:n varavoimakeskuksesta M33+100H, jossa jännite on noin 90 %:a nimellisarvosta. Luvussa kuusi on esitetty parannusehdotuksia varavoimaverkon jännitteen laadun parantamiseksi.

5.11.3 Varavoimaverkon suojaukset

Porvoon jalostamon varavoimaverkon suojausten tarkastelussa tutkittiin varavoimakusten nimellisvirraltaan suurimman sulakkeen toiminta pienimmällä mahdollisella vikavirralla. Jokaisesta varavoimaverkon muuntamon varavoimakiskosta tutkittiin, toteutuuko nimellisarvoltaan suurimman sulakkeen suojaus vaaditussa toiminta-ajassa yksivaiheisen maasulun vikavirralla varavoimakäytössä. Suojaukset oli mitoitettu pääsääntöisesti hyvin, sillä ainoastaan kahdessa varavoimakeskuksesta oli ongelmia suojausten

toteutumisen kanssa. Taulukossa 5.30 on esitetty varavoimakeskukset, joissa suojaus ei toimisi vaaditussa ajassa varavoimakäytössä.

Taulukko 5.30. Varavoimakeskukset, joissa suojaus ei toteudu vaaditussa toiminta-ajassa varavoimakäytössä.

Vikapaikka	U_n [kV]	Vikapaikan suurin sulake, t.aika	I_k'' [kA]	S_k'' [MVA]	I_k [kA]	S_k [MVA]	Suojaus toteutuu
M101+200H	0,4	gG 400 A, 5 s.	5,15	1,19	1,90	0,44	Ei (10 s)
M37+100H	0,4	gG 630 A, 5 s.	4,24	0,98	0,84	0,19	Ei > 100 s.

Muuntamon M101 kiskolla M1010+200H suurin sulake on gG 400 A sulake, jolla kestäisi 10 sekuntia avata vioittunut virtapiiri, mikäli sulakkeen takana olevalla kiskolla M101+100H tapahtuisi yksivaiheinen maasulku. GG 300 A sulakkeella suojaus toteutuisi vaaditussa viiden sekunnin toiminta-ajassa.

Muuntamon M37 kiskolla M37+100H suurin sulake on gG 630 A sulake, jolla kestäisi yli 100 sekuntia avata vioittunut virtapiiri, mikäli sulakkeen takana olevalla kiskolla M37+20H tapahtuisi yksivaiheinen maasulku. GG 200 A sulakkeella suojaus toteutuisi vaaditussa viiden sekunnin toiminta-ajassa. Muuntamon M37 kiskon M37+100H lähdeillä keskuksiin M37+10H, M46+100H ja M39+100H on myös liian suuret sulakkeet, jotka pitäisi vaihtaa gG 200 A tai sitä nimellisvirta-arvoltaan pienempiin sulakkeisiin.

Porvoon jalostamon varavoimaverkosta tutkittiin myös varavoimakeskusten välisten johto-osuuksien suojaus kolmivaiheisella oikosululla varavoimakäytössä. Varavoimaverkon tulisi toimia vikatilanteissa selektiivisesti, vaikka verkkoa syötettäisiin varavoimageneraattoreilla. Varavoimaverkon saarekkeita käsittelevissä kappaleissa on esitetty, miten nopeasti johto-osuuksilla oleva suojaus toimisi, mikäli johto-osuuksien päässä tapahtuisi kolmivaiheinen oikosulku.

Varavoimaverkon johto-osuuksien suojauksessa on käytetty pien- sekä keskijännitteille suunniteltuja sulakkeita sekä suojareleitä. Jotkin johto-osuudet olivat kokonaan ilman suojausta. Diplomityössä keskityttiin Porvoon jalostamon varavoimaverkon teho-
tasapainon ja jännitteenlaadun tutkimiseen. Varavoimaverkon suojausta ja verkon selektiivisyyttä pitäisikin tutkia omana erillisenä kokonaisuutena. Tässä työssä mallinnetut vikavirrat ja suojausten tarkastelut antavat kuitenkin hyvää pohjatietoa jatkotoimenpiteiden suunnittelulle.

6 VARAVOIMAVERKON PARANNUSEHDOTUKSET

6.1 Generaattoreiden kuormitusasteiden parantaminen

Taulukossa 5.28 on esitetty Porvoon jalostamon varavoimaverkkoon kytkettyjen generaattoreiden kuormitusasteet varavoimakäytössä, kun kaikki varavoimaverkon kuormat ovat kytkettyinä päälle ja ne toimivat täydellä teholla. Generaattoreiden parannusehdotuksia suunniteltaessa tavoitteena oli, että varavoimatilanteessa jokainen varavoimaverkon generaattori toimisi 75 %:n tai sitä pienemmällä kuormitusasteella. Taulukosta 5.28 huomataan, että generaattoreilla GE-6107 ja GE-6109 kuormitusaste oli enemmän kuin 75 %.

Luvussa 5.8 on käsitelty säiliö- ja satama-alueen varavoimakäytön ongelmia. Alueilla ei tällä hetkellä ole omaa varavoimageneraattoria, mutta alueiden varavoimasyötön varmistamiseksi alueille pitäisi hankkia uusi varavoimageneraattori.

Varavoimageneraattorit oheislaitteineen ovat kalliita investointeja, joten varavoimaverkon generaattoreiden kuormitusasteita pyrittiin tasaamaan erilaisilla varavoimaverkon kytkennöillä.

6.1.1 Generaattorin GE-6107 kuormitusasteen parantaminen

Varavoimaverkon selvitystyön tuloksena selvisi, että generaattori GE-6107 toimisi varavoimakäytössä 88 % kuormitusasteella ja generaattori GE-6106 toimisi 63 % kuormitusasteella. Siirtämällä muuntamoiden M28 ja M33 varavoimakeskusten kuormat, joiden yhteenlaskettu pätöteho on noin 70 kW, generaattorilta GE-6107 generaattori GE-6106:n perään, saataisiin edellä mainittujen generaattoreiden kuormitusasteita tasatua.

Liitteessä kuusi on esitetty Porvoon jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimajakelukaavio, johon on mallinnettu NEPLAN:lla parannusehdotukset ja uudet generaattoreiden jakelualueet. Liitteessä kuusi muuntamoiden M28 ja M33 varavoimakeskusten syöttö tulee jakelumuuntajan kautta muuntamo M1:n varavoimakeskuksesta M1+100G. Liitteessä kuusi on muutettu myös muuntamo M4:n varavoimasyöttö tulemaan generaattorilta GE-6107 generaattorin GE-6106 sijaan.

Generaattori GE-6107 sijaitsee muuntamolla M2 ja kuten kuvasta 5.2 huomataan, muuntamo M4 on muuntamoa M2 lähimpänä oleva muuntamo. Siirtämällä muuntamo M4:n varavoimakeskuksen syöttö tulemaan muuntamo M2:n generaattorilta GE-6107, muuntamon M4:n varavoimakeskuksen jännitteen laatu paranee ja generaattoreiden syöttämien alueiden rajat selkeytyvät.

Muuntamoiden M78 ja M89 varavoimakeskukset oli myös kytketty generaattorin GE-6107 perään. Muuntamot M78 ja M89 sijaitsevat TL 3 alueella, joten ne voitaisiin siirtää generaattori GE-6109:n perään, sillä generaattori GE-6109 sijaitsee muuntamoiden M78 ja M89 lähellä. Liitteessä kuusi on mallinnettu uusi kytkentätilanne, jossa muuntamoiden M78 ja M89 varavoimakeskusten syöttö tulee muuntamon M37 varavoimakeskuksesta M37+100G. Taulukossa 6.1 on esitetty Porvoon jalostamon varavoimaverkon generaattoreiden uudet kuormitusasteet, luvuissa 6.1.1 ja 6.2.2 esitettyjen parannusehdotusten jälkeen.

Taulukko 6.1. Parannusehdotusten mukaiset Porvoon jalostamon varavoimaverkon generaattoreiden kuormitusasteet.

Generaattori	Kuormitusaste
GE-6104	46 %
GE-6105	72 %
GE-6106	67 %
GE-6107	67 %
GE-6109	63 %
GE-6111	75 %
GE-6112	75 %
GE-6113	25 %
GE-6114	46 %

Edellä mainittujen muutosten jälkeen generaattori GE-6106:n kuormitusaste nousi 67 %:iin, generaattori GE-6107:n kuormitusaste laski 67 %:iin ja generaattori GE-6109:n kuormitusaste nousi 133 % prosenttiin. Generaattoreiden GE-6106 ja GE-6107 kuormitusasteet ovat muutosten jälkeen sallituissa rajoissa. Luvussa 6.1.2 on esitetty, miten generaattori GE-6109:n kuormitusastetta parannetaan sekä säiliö- ja satama-alueen varavoimasyöttö varmistetaan.

6.1.2 Generaattorin GE-6109 kuormitusasteen parantaminen sekä säiliö- ja satama-alueen varavoimasyötön varmistaminen

Generaattorin GE-6109 kuormitusaste oli taulukon 5.28 mukaan 95 % ja luvussa 6.1.1 esitettyjen muutosten jälkeen 133 %. Generaattori GE-6109 on nimellisteholtaan 325 kVA ja sillä syötetään TL 3 alueen varavoimakuormia.

Suuren kuormitusasteen vuoksi muuntamolla M37 oleva varavoimageneraattori GE-6109 pitäisikin vaihtaa nimellisteholtaan suurempaan generaattoriin. Esimerkiksi nimellisteholtaan 685 kVA varavoimageneraattorilla uusi käyttöaste olisi muutosten jälkeen 63 %.

Luvussa 5.8 on kerrottu säiliö- ja satama-alueen varavoimasyötön ongelmista. Alueiden varavoimasyöttö pitäisi taata alueelle sijoitetulla omalla varavoimageneraattorilla.

Säiliö- ja satama-alueen varavoimakuormien yhteenlaskettu pätötehon tarve on noin 120 kW. Jos muuntamolla M37 oleva generaattori uusitaan nimellisteholtaan suurempaan varavoimageneraattoriin, voisi vanhan nimellisteholtaan 325 kVA olevan generaattorin sijoittaa esimerkiksi säiliöalueen muuntamolle M130.

Muuntamolle M130 sijoitetulla varavoimageneraattorilla hoidettaisiin säiliö- ja satama-alueen tehonsyöttö varavoimatilanteissa. Mikäli entisellä TL 3 alueen GE-6109 varavoimageneraattorilla hoidettaisiin säiliö- ja satama-alueiden varavoimasyöttö, jäisi sen kuormitusaste 46 %:iin.

Liitteessä kuusi on esitetty varavoimaverkon uusi kytkentätilanne, jossa muuntamo M130:n varavoimakiskoon M130+1100H on kytketty vanha TL 3 alueen varavoimageneraattori ja muuntamo M37:n varavoimageneraattorin nimellisteho on nostettu 685 kVA:iin. Muuntamolle M130 siirretyn generaattorin tunnukseksi on merkitty GE-6114 juoksevan numeroinnin mukaisesti.

Liitteessä kuusi 400 V:n varavoimakiskon M130+1100H ja 10 kV:n varavoimakiskon M130+100G väliin on kytketty 315 kVA muuntaja, jonka väliottokytkimellä on nostettu keskijännitepuolen jännitettä 5 %:a. Säiliö- ja satama-alueen varavoiman tehonsyöttö tapahtuu 10 kV:n jännitetasossa.

6.2 Varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen

Porvoon jalostamon varavoimaverkon keskuksilla jännitteen tulisi olla vähintään 98 %:a ja korkeintaan 105 %:a jännitteen nimellisarvosta. Tällä varmistutaan siitä, että keskuksilta syöttönsä saavissa kojeissa, erityisesti oikosulkumoottoreissa, jännite on ± 5 %:n sisällä nimellisarvosta. Jännitteen laatu vaikuttaa neliöllisesti moottorin vääntömomenttiin ja siksi onkin tärkeää, että varavoimaverkon sähkön laatu on korkeatasoista.

Taulukossa 5.29 on esitetty 33 Porvoon jalostamon varavoimaverkon solmupistettä, joissa jännite ei ole sallituissa rajoissa NEPLAN:sta saatujen laskentatulosten perusteella. Ainoastaan generaattoreiden GE-6104, GE-6105 ja GE-6113 syöttämissä varavoimaverkon saarekkeissa jännite oli jokaisessa saarekkeen solmupisteessä sallituissa rajoissa. Muiden generaattoreiden syöttämissä saarekkeissa oli vähintään yhdessä saarekkeen solmupisteessä liian alhainen jännite.

Varavoimaverkkojen mallinnuksessa oletuksena oli, että kaikki varavoimaverkon kuormitukset ovat kytkettyinä päälle ja ne toimivat täydellä teholla. Muuntajissa oletuksena oli, että niiden väliottokytkimet olivat nolla-asennossa. Jännitteiden alenemiin pyrittiin vaikuttamaan säätämällä muuntajien väliottokytkimiä ja uusimalla syöttökaapeleita pinta-alaltaan suurempiin kaapeleihin. Kuvassa 5.2 on esitetty Porvoon jalostamon jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkko, johon on merkitty varavoimageneraattoreiden syöttämien saarekkeiden rajat.

6.2.1 Generaattorin GE-6106 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen

Generaattori GE-6106:n syöttämän saarekkeen alueella oli taulukon 5.29 mukaan yhteensä seitsemässä varavoimaverkon solmupisteessä liian alhainen jännite. Muuntamo M79:n varavoimakeskuksesta M79+100H tulee varavoimakeskusten M7+V, M7+100H, M8+100H, PK_7R15_TOIMISTO ja VVK-LAHETTÄMÖ varavoimasyöttö, kuten

kuvassa 5.2 on esitetty. Asettamalla muuntajan M79=T41M väliottokytkin asentoon -1, jolloin pienjännitepuolen jännite nousee 2,5 %:a, saadaan muuntamon M79 alapuolella olevissa varavoimakeskuksissa jännite nostettua yli 98 %:iin.

Edellä mainittujen saarekkeen solmupisteiden lisäksi jännite oli liian alhainen varavoimakeskuksissa M12+100H, M4+100H, SÄILIÖALUEEN_TUKITILA_IA-025 ja M19+100H. Luvussa 6.1.1 on esitetty parannusehdotus, jolla muuntamo M4:n varavoimakeskuksen M4+100H jännite saadaan nostettua sallittuihin.

Varavoimakeskukselta M108+100H tulee muuntamon M19 varavoimakeskuksen M19+100H syöttö. Varavoimakeskukset on yhdistetty AMCMK 4x70+21 kaapelilla, jonka tunnus on 106-1001. Kaapeli pitäisi vaihtaa esimerkiksi AMCMK 3x185+57 kaapeliin, jolloin varavoimakeskus M19+100H:n jännite nousisi 98,21 %:iin.

Edellä mainittujen toimenpiteiden lisäksi muuntajan M17=T41M väliottokytkin pitäisi asettaa arvoon -1, jolloin pienjännitepuolen jännite nousee 2,5 %:a. Tällä varmistuttaisiin siitä, että liitteessä kuusi esitetyssä uudessa kytkentätilanteessa varavoimakeskusten M12+100H ja SÄILIÖALUEEN_TUKITILA_IA-025 jännitteet ovat sallituissa jänniterajoissa.

6.2.2 Generaattorin GE-6107 syöttämien varavoimakeskusten jänniteenalenemien parantaminen

Generaattori GE-6107:n syöttämän saarekkeen alueella oli taulukon 5.29 mukaan yhteensä 14 varavoimaverkon solmupistettä, joissa jännite oli liian alhainen. Luvussa 6.1.1 kerrottiin parannusehdotukset generaattori GE-6107:n kuormitusasteen parantamiseksi. Luvussa ehdotettiin, että muuntamoilla M78 ja M89 sijaitsevien varavoimakeskusten varavoimasyöttö tulisi jatkossa generaattorilta GE-6109. Uudella kytkennällä ja asettamalla muuntajan M78=T41M väliottokytkin asentoon -1, jolloin pienjännitepuolen jännite nousee 1,5 %:a, varavoimakeskusten M78+100H, M89+100H, M89+100RH ja M89+RH200 jännitteet nousevat yli 98 %:iin.

Muuntajalta M101=T41M tulee varavoimakeskusten M101+100H, M101+200H, M81+500H ja M81+9200RH varavoimasyöttö. Muuntajan M101=T41M väliottokytkin pitäisi asettaa asentoon -1, jolloin pienjännitepuolen jännite nousee 2,5 %:a. Tällä saadaan nostettua edellä mainittujen varavoimakeskusten jännitteet sallittuihin rajoihin.

Luvussa 6.1.1 esitettiin uusi kytkentätilanne, jossa muuntamoiden M28 ja M33 varavoimakeskusten syöttö tulee jakelumuntajan M28=T41M kautta muuntamo M1:n varavoimakeskukselta M1+100G. Asettamalla uuden M28=T41M jakelumuntajan väliottokytkin asentoon -2, jolloin pienjännitepuolen jännite nousee 5 %:a, saadaan varavoimakeskusten M1+10H, M28+V, M28+100H, M28+200H, M28+300H ja M33+100H jännitteet nostettua sallittuihin rajoihin, kuten liitteessä kuusi on esitetty.

6.2.3 Generaattorin GE-6109 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen

Generaattori GE-6109:n syöttämällä alueella oli taulukon 5.29 mukaan vain yhdessä solmupisteessä liian alhainen jännite. Varavoimakeskus M38+100H:n jännite oli 97,16 %:a nimellisarvosta.

Kuvan 5.2 mukaisesti varavoimakeskus M38+100H:n varavoimasyöttö tulee varavoimakeskus M37+100H:sta, johon myös generaattori GE-6109 on kytketty. Varavoimakeskusten välinen AMCMK 3x120+41 kaapeli, jonka tunnus on 37-1002, pitäisi vaihtaa esimerkiksi AMCMK 3x240+70 kaapeliin. Pinta-alaltaan suuremmalla kaapelilla varavoimakeskus M38+100H:n jännite nousisi 98,22 %:iin.

6.2.4 Generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämien varavoimakeskusten jännitteenalenemien parantaminen

Generaattori GE-6111:n syöttämän saarekkeen alueella oli taulukon 5.29 mukaan yhteensä viisi varavoimaverkon solmupistettä, joissa oli liian alhainen jännite ja generaattori GE-6112:n syöttämän saarekkeen alueella oli yhteensä kuusi varavoimaverkon solmupistettä, joissa oli liian alhainen jännite. Liitteessä neljä on esitetty generaattoreiden GE-6111 ja GE-6112 syöttämät saarekkeet NEPLAN:iin mallinnettuna. Taulukosta 5.29 ja liitteestä neljä nähdään, missä saarekkeiden varavoimakeskuksissa jännite oli alle sallitun rajan.

Asettamalla muuntajien M120=T43M, M120=T44M ja M120=T45M väliottokytkimet asentoon -2, jolloin 400 voltin puolen jännitteet nousisivat 5 %:a, saataisiin varavoimakeskusten 120RH200, 120RH600, 400H, 120RH500, ANALYSAATTORISUOJA IA-270, ANALYSAATTORISUOJA IA-271, 500H JA 120RH100 jännitteet nousemaan yli 98 %:iin Muuntajan IA244=T41M väliottokytkimellä riittää, kun se asetetaan asentoon -1, jolloin 400 voltin puolen jännite nousee 2,5 %:a. Tällä toimenpiteellä saataisiin nostettua varavoimakeskusten 244H100, 244RH100 ja SK404 jännitteet sallittuihin rajoihin, eli 98 %:n ja 105 %:n väliin.

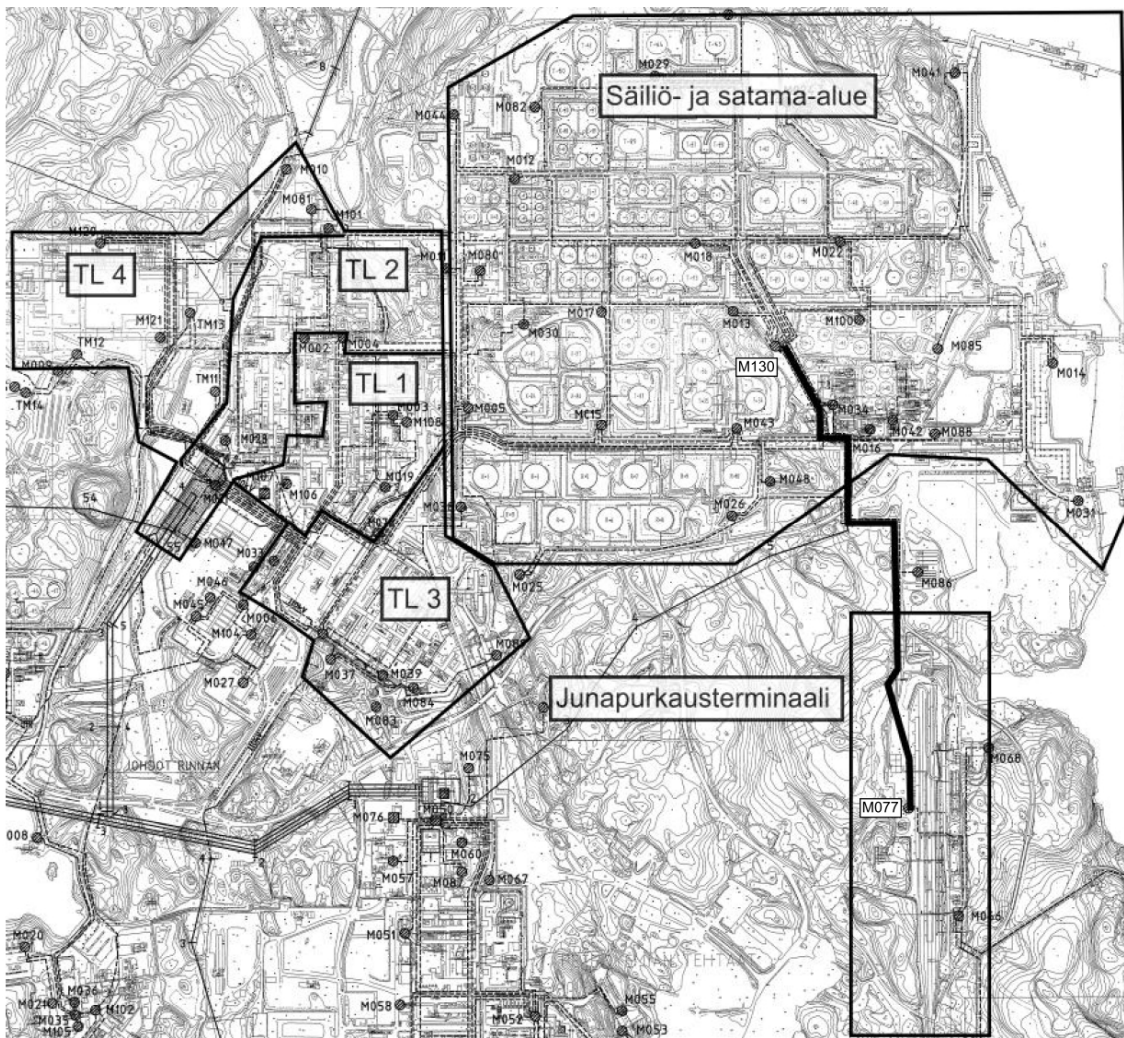
6.3 Yleisiä parannusehdotuksia Porvoon jalostamon varavoimaverkkoon

Porvoon jalostamon varavoimaverkolla pyritään takaamaan turvalliset työskentelyolosuhteet jalostamon eri alueille häiriötilanteissa. Teknologiakeskuksessa, pilot-alueilla ja junapurkausterminalissa ei kuitenkaan ole ollenkaan varavoimaan kytkettyä valaistusta tai muuta kuormaa. Varavoimaverkkoon on kytketty noin kolmasosa jalostamon muiden alueiden valaistuksesta. Alueiden valaistus kuluttaakin merkittävän osan varavoimageneraattoreiden tuottamasta tehosta.

Valaistus on perinteisesti hoidettu loisteputkilla sekä suurpainenatriumlampuilla. Nykyään LED-tekniikalla voidaan kuitenkin tuottaa sama valaistusteho kuin loisteputkilla. LED-valoputki vaatii noin kolmanneksen vähemmän tehoa kuin vastaavanlainen

loisteputki ja LED-valaisimilla on myös todella pitkä käyttöikä, joten ylläpitokustannukset ovat loisteputkia pienemmät. Generaattoreiden käyttöastetta saataisiin laskettua vaihtamalla jalostamoalueen varavoimakeskuksiin kytketyt loisteputkivalaisimet LED-valaisimiin.

Luvussa 6.1.2 kerrottiin parannusehdotuksia säiliö- ja satama-alueen varvoimasyötön turvaamiseksi. Muuntamon M130:n varavoimakeskuksesta M130+100G voisi vetää uuden 10 kV:n varavoimayhteyden muuntamolle M77, joka on yksi junapurkausterminaalien muuntamoista. Kuvassa 6.1 on esitetty Porvoon jalostamon suurjännitekartta, johon on merkitty mahdollinen 10 kV:n yhteys muuntamolta M130 muuntamolle M77. Uusi 10 kV:n varavoimakaapeli voisi kulkea samaa reittiä kuin muuntamolle M77 tuleva normaalisyötön 10 kV:n kaapeli, tällöin varavoimakaapelille ei tarvitsisi rakentaa uutta kaapelihyllyä.



Kuva 6.1. Porvoon jalostamon jalostamoalue sekä mahdollinen 10 kV:n varavoimayhteys muuntamolta M130 muuntamolle M77.

Muuntamo M77 sijaitsee keskellä junapurkausterminaalien ja sieltä tulee muun muassa alueen valaistuksen sekä tukitilan syöttö normaaliolosuhteissa. Jos osa alueen ja

tukitilan valaistuksista varmennettaisiin varavoimageneraattorilla, muuntamoon M77 olisi kytkettynä yhteensä noin 10 kW:a varavoimakuormaa.

Liitteessä kuusi on esitetty jalostamo-, säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkon jakelukaavio ja liitteessä seitsemän on esitetty siitä saadut tehonajon laskentatulokset kytkentätilanteessa, jossa on huomioitu kaikki parannusehdotuksissa esitetyt toimenpiteet.

Muuntamo M77 on yhdistetty muuntamo M130:n 10 kV:n varavoimakiskoon M130+100G 1,5 km pitkällä AHXCMK-WTC/PE 3*25/16 teollisuuskaapelilla ja muuntamolle M77 on asennettu 50 kVA:n jakelumuuntaja M77=T41M, josta tulee muuntamo M77:n varavoimakeskus M77+100H:n varavoimasyöttö. Varavoimakeskuksen kuormaksi on liitteessä kuusi mallinnettu 10 kW vakiokuorma, joka on nimetty M77+100H_kuorma-arvioksi.

NEPLAN:sta saatujen laskentatulosten perusteella muuntamo M77:n lisääminen generaattori GE-6114:n syöttämään varavoimaverkkoon ei aiheuttaisi ongelmia generaattori GE-6114:n syöttämässä varavoimasaarekkeessa.

Varavoimaverkon mallinnusta tehtäessä paljastui, että Porvoon jalostamon sähköistystä käsittelevä dokumentointi on sekavaa ja dokumenttien löytämiseen sähköisestä arkistosta kului todella paljon aikaa. Varavoimaverkon dokumenttien nimeämisen ohjeistukseen pitäisi kiinnittää enemmän huomiota. Dokumentteja päivittäessä pitäisi myös varmistaa, että johonkin dokumenttiin tehtävät muutokset päivitetään myös muihin tarvittaviin dokumentteihin. Varavoimakeskusten nimeäminen pitäisi myös yhdenmukaistaa, jotta varavoimaverkon suunnittelu ja käyttö selkeytyisi.

Varavoimaverkkoa käsittelevistä dokumenteista paljastui, että varavoimaverkkoon kytkettyjen suurten moottoreiden käynnistys tapahtuu suoralla käynnistyksellä. Taa-juusmuuttajien tai pehmokäynnistimien käyttö pienentäisi moottorien käynnistyksestä aiheutuvien suurten virtapiikkien muodostumista.

Varavoimaverkon varavoimakeskuksista oli todella vähän käytettävissä mittaustietoja. Tästä johtuen mallinnuksessa tehtyt varavoimakeskusten kuormitukset olivat suurelta osin arvioita. Varavoimakeskusten virtamittauksilla voitaisiin tarkkailla sähköön kulu- tusta ja jatkossa voitaisiin tehdä tarkempien mallinnuksia.

6.4 Parannusehdotuksista aiheutuvat kustannukset

Diplomityön tavoitteena oli suorittaa Porvoon jalostamon varavoimaverkolle tehotasa- paino- vika- ja laatutarkastelut. Edellä mainittujen tarkasteluiden pohjalta selvitettiin, miten nykyistä varavoimaverkkoa voitaisiin parantaa.

Varavoimaverkon tehtävänä on mahdollistaa jalostamon turvallinen alasajo sekä taa- ta turvalliset työskentelyolosuhteet häiriötilanteissa. Koska varavoimaverkon tehtävänä on lisätä jalostamon turvallisuutta, siitä saatavaa hyötyä on vaikea mitata euromääräi- sesti. Diplomityössä keskitytäänkin vain parannusehdotuksista aiheutuviin kustannuk- siin.

Parannusehdotusten kustannuksia arvioitaessa on ajateltu, että Porvoon jalostamon sähköosaston kunnossapito tekee varavoimaverkon muutostyöt, jolloin työstä ei aiheudu

yhtiölle ulkopuolisia kuluja. Kustannusten arvioinneissa on kerrottu, miten paljon verkkoon vaihdettavat ja lisättävät komponentit maksavat, sekä miten monta tuntia töiden tekemiseen arvioidaan kuluvan.

Kustannusten arvioinnit on tehty pääosin sähköinfo oy:n julkaiseman sähköurakan yksikköhintakustannuksia 2006 -kirjan sekä energiamarkkinaviraston julkaiseman verkkokomponentit ja indeksikorjatut yksikköhinnat vuodelle 2011 -verkkodokumentin perusteella. Luvussa 6.3 esitettyä parannusehdotusta loisteputkien vaihtamisesta LED-valaisimiksi ei ole käsitelty kustannusten arvioinneissa.

6.4.1 Tehotasapainon parantamisesta aiheutuvat kustannukset

Tehotasapainon parantamiseksi työssä ehdotettiin generaattoreiden GE-6106, GE-6107 ja GE-6109 syöttämien saarekkeiden kytkentätilanteen muuttamista, muuntamalla M37 olevan generaattorin GE-6109:n siirtämistä muuntamolle M130 sekä muuntamalla M37 olevan generaattorin uusimista nimellisteholtaan suuremaan varavoimageneraattoriin.

Generaattoreiden GE-6106, GE-6107 ja GE-6109 syöttämien saarekkeiden kytkentätilanteiden muutostöihin kuului yhteensä kolmen uuden kaapelin ja yhden jakelumuuntajan hankinta ja asennus. Taulukossa 6.2 on esitetty uusittavan kaapelin tunnus, -pituus, -lajimerkki, -hintaa, johto-osuuden kokonaishinta sekä asennustöihin kuluva aika. Johto-osuuden kokonaishinnassa on otettu huomioon kaapelin metrihinnan lisäksi hiekkatäytteisiin kaapelikanaviin asennuksesta aiheutuvat lisäkustannukset.

Uudet asennettavat kaapelit on nimetty muuntamoiden tunnuksilla, esimerkiksi muuntamoiden M2 ja M4 varavoimakeskusten välille asennettava uusi 400 voltin kaapeli on nimetty M2-M4.

Taulukko 6.2. Kaapeleiden muutostöistä aiheutuvat kustannukset.

Kaapelin tunnus	Kaapelin pituus [m]	Kaapelin lajimerkki	Kaapelin hinta [€/100 m]	Johto-osuuden kokonaishinta [€]	Työn kesto
M2-M4	100	AMCMK-HF 3x70/21	1640	4990	24 h
M1-M28	150	AHXAMK-W 3x95/35	2520	8805	24 h
M37-M78	400	AHXAMK-W 3x95/35	2520	23480	24 h
			Yhteensä	37275	108 h

Taulukossa 6.2 kaapelin M1-M28 muutostöihin kuului myös uuden 100 kVA jakelumuuntajan sekä uuden 10 kV:n kojeiston asentaminen muuntamolle M28. Uuden jakelumuuntajan arvioitu hinta on 6490 € ja kojeiston sekä siihen liittyvien suojalaitteiden hinta on noin 7800 €, joten varavoimakeskusten M1+100G ja M28+V välisen johto-osuuden uusiminen maksaisi yhteensä arviolta 21835 €. 10 kV:n kojeiston hinta sisältää kennon suojaukset sekä mittaukset

Generaattori GE-6109:n siirrosta aiheutuvat kustannukset muodostuvat muuntamo M130:n varavoimakeskuksessa aiheutuvista muutos- ja asennustöistä. Muuntamolle M130 siirretyn generaattorin tunnus on jatkossa GE-6114. Muuntamalla M37 olevan generaattorin vaihtamisesta muodostuvat kustannukset koostuvat uuden dieselgeneraattorin hankintakustannuksista sekä siihen liittyvistä asennustöistä.

Liitteessä kuusi on esitetty parannusehdotuksissa esitelty kytkentätilanne jalostamo-säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkolle. Siinä muuntamo M130:lle on sijoitettu generaattori GE-6114. Generaattorin tai muuntajan M130=T41M hankinnasta ei aiheudu uusia kuluja, vaan kustannukset syntyvät muuntamo M130:n varavoimakiskojen vahvistamisesta sekä muuntamo M130:llä tehtävistä rakennemuutoksista.

Muuntamo M130:n varavoimakeskusta ollaan vasta suunnittelemassa, joten muuntamon varavoimakeskuksessa ei tarvitse tehdä muutostöitä, jos jo suunnitteluvaiheessa varaudutaan siihen, että jatkossa muuntamon 400 voltin varavoimakiskoon tullaan kytkeämään nimellisteholtaan 325 kVA varavoimageneraattori. Jos muuntamon M37 vanha varavoimageneraattori siirretään kaikkine oheislaitteineen muuntamolle M130, rakennus- ja asennustöistä aiheutuvat kustannukset ovat noin 40000 €:a. Kustannusarvio perustuu aikaisempien varavoimayksiköiden tarjouspyynnöistä saatuihin hintoihin.

Liitteessä kuusi on esitetty myös muuntamolle M37 asennettu uusi 685 kVA varavoimageneraattori. Muuntamalla M37 on jo olemassa tilat varavoimageneraattorille ja varavoimakiskon M37+100H virtakestoisuus riittää, vaikka kiskoon asennettaisiin nimellisteholtaan suurempi generaattori, joten uuden generaattorin kustannukset muodostuvat varavoimayksikön hankintahinnasta sekä asennuksesta. Uusi 685 kVA Catepillar:n varavoimayksikkö paikalleen asennettuna maksaisi Witraktor:n hintojen mukaan noin 100000 €:a

6.4.2 Jännitteenalenemien parantamisesta aiheutuvat kustannukset.

Luvussa 6.2 on kerrottu toimenpiteet, joilla Porvoon jalostamon varavoimaverkon varavoimakeskuksissa saadaan nostettua jännite sallittuihin rajoihin. Taulukossa 6.3 on esitetty tuntiarvio muuntajien väliottokytkimien asennon muuttamiseen kuluva ajasta.

Taulukko 6.3. Muuntajien väliottokytkinten muutostöihin kuluva aika.

Muuntaja	Työn kesto
M79=T41M	2 h
M17=T41M	2 h
M78=T41M	2 h
M101=T41M	2 h
M120=T41M	2 h
M120=T44M	2 h
M120=T45M	2 h
IA244=T41M	2 h
Yhteensä	16 h

Muuntajien väliottokytkimien asentojen muutostöihin kuluu aikaa yhteensä arviolta 16 tuntia. Tuntiarviossa on otettu huomioon muuntajilla tehtävät työmaadoitukset sekä väliottokytkimien kääntämiseen kuluva aika. Muuntajilla tehtävien muutostöiden lisäksi jännitteenalenemien parantamiseksi ehdotettiin varavoimakeskuksille M19+100H ja M38+100H tulevien syöttökaapeleiden vaihtamista pinta-alaltaan suurempiin kaapeleihin.

Taulukossa 6.4 on esitetty kaapeleiden muutostöistä aiheutuvien kustannusten arvio. Taulukon sarakkeissa on esitetty uusittavan kaapelin tunnus, -pituus, -lajimerkki, -hintaa, johto-osuuden kokonaishinta sekä asennustöihin kuluva aika. Johto-osuuden kokonaishinnassa on otettu huomioon kaapelin metrihinnan lisäksi hiekkatäytteisiin kaapelikanaviin asennuksesta aiheutuvat lisäkustannukset

Taulukko 6.4. Kaapeleiden muutostöistä aiheutuvat kustannukset.

Kaapelin tunnus	Kaapelin pituus [m]	Kaapelin lajimerkki	Kaapelin hinta [€/100 m]	Johto-osuuden kokonaishinta [€]	Työn kesto
106-1001	220	AMCMK 3x185/57	3460	14982	24 h
37-1002	330	AMCMK 3x240/72	4320	25311	24 h
			Yhteensä	40293	48 h

Taulukossa 6.4 kaapeleiden muutostöistä aiheutuvat kustannukset olisivat yhteensä noin 40000 €.

6.4.3 Junapurkaustermiinalin liittämisestä varavoimaverkkoon aiheutuvat kustannukset

Luvuissa 6.1.2 ja 6.3 kerrottiin toimenpiteet, joilla junapurkaustermiinalin muuntamo M77 voitaisiin liittää säiliö- ja satama-alueen varavoimaverkkoon. Varavoima muuntamolle M77 tulisi muuntamon M130 generaattorilta GE-6114, jonka asentamisesta aiheutuneet kustannukset kerrottiin luvussa 6.4.1.

Muuntamoiden M130 ja M77 välille on jo valmiiksi rakennettu kaapelihyllyt, johon uusi 10 kV:n varavoimakaapeli voitaisiin asentaa. Taulukossa 6.5 on esitetty muuntamo M77:n liittämisestä varavoimaverkkoon muodostuneet kustannukset. 10 kV:n ja 0,4 kV:n kojeistohinnoissa on huomioitu johto-osuuden suojaus- ja mittauskomponenttien kustannukset.

Komponenttien tunnuksia on nimetty Porvoon jalostamon nimeämisohjeita noudattaen, pois lukien kaapelin tunnus, joka on nimetty M130-M77.

Taulukko 6.5. Muuntamon M77 kytkemisestä varavoimaverkkoon aiheutuvat materiaalikustannukset.

Verkkokomponentti	Komponentin tunnus	Yksikköhinta	Kokonaishinta
AHXCMK 3x25/16 -kaapeli	M130-M77	1790 € / 100 m	26 850 €
50 kVA jakelumuuntaja	M77=T41M	4550 € / kpl	4 550 €
10 kV:n kojeisto	M77+100G	7800 € / kpl	7 800 €
0,4 kV:n kojeisto	M77+100H	5600 € / kpl	5 600 €
		Yhteensä	44 800 €

Muuntamo M77:n kytkeminen varavoimaverkkoon tulisi maksamaan materiaalien osalta noin 44800 €. Taulukossa 6.4 ilmoitettujen materiaalihintojen lisäksi töiden suorittamiseen pitäisi varata kahden asentajan viikon työtunnit.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää, selviäisikö Porvoon jalostamon varavoimaverkko sille asetetuista tehtävistä varavoimatilanteessa. Selvitys tehtiin suorittamalla Porvoon jalostamon varavoimaverkolle tehotasapaino-, vika- ja laatutarkastelut NEPLAN nimisellä verkostonlaskentaohjelmistolla. Pääpaino tarkasteluissa oli tehotasapainon ja jännitealenemien tarkasteluissa. Tarkastelujen pohjalta diplomityössä esitettiin parannusehdotuksia, joilla varavoimaverkon toimintaa voitaisiin parantaa.

Porvoon jalostamon varavoimaverkko koostuu yhteensä yhdeksästä eri generaattorisarekkeesta. Tarkasteluissa selvisi, että varavoimaverkon kuormat olivat jakaantuneet epätasaisesti eri generaattoreille ja useiden varavoimakeskusten jännite oli alle sallittujen rajojen.

Pahin tehotasapainotilanne Porvoon jalostamon varavoimaverkossa oli jalostamon säiliö- ja satama-alueilla, jonne oli rakennettu varavoimaverkko, mutta häiriötilanteessa alueille ei kuitenkaan olisi tullut lainkaan varavoimaa. Työssä myös selvisi, että jalostamon junapurkausterminalin alueelle ei tulisi lainkaan varavoimaa häiriötilanteissa. Alueella käsitellään palavia nesteitä, joten alueen liittäminen varavoimaverkkoon on perusteltua.

Varavoimageneraattorit ovat suhteellisen kalliita investointeja, joten tehotasapainon parantamiseksi työssä pyrittiin tasaamaan varavoimageneraattoreiden kuormituksia uusilla verkon kytkennöillä. Diplomityön parannusehdotuksissa esitetyssä uudessa varavoimaverkon kytkentätilanteessa jokainen varavoimageneraattori toimi korkeintaan 75 %:n kuormitusasteella, kun kaikki siihen liitetty varavoimakuorma oli kytketty päälle ja ne toimivat täydellä teholla.

Porvoon jalostamon varavoimaverkossa jännitteen tulisi olla varavoimakeskuksilla 98 % - 105 % nimellisarvosta ja kojeella ± 5 % nimellisarvosta. Varavoimaverkon keskusten jännitealenemia pyrittiin parantamaan muuttamalla jakelumuuntajien väliotto-kytkimien asentoja. Kahden varavoimakeskuksen jännitealenemaan ei pystytty vaikuttamaan muuntajien väliottokytkimillä, joten diplomityössä ehdotettiin näiden varavoimakeskusten syöttökaapeleiden uusimista pinta-alaltaan suurempiin kaapeleihin.

Porvoon jalostamon varavoimaverkolle suoritettussa vikatarkastelussa tutkittiin myös erilaisten suojauksien toteutuminen 1-vaiheisen maasulun ja 3-vaiheisen oikosulun vikavirroilla. Jokaisen varavoimakeskuksen suurimman sulakkeen laukeaminen tutkittiin pienimmällä mahdollisella vikavirralla, eli 1-vaiheisen maasulun vikavirralla. Mikäli sulake laukesi vaaditussa toiminta-ajassa, tehtiin päätelmä, että varavoimakeskukseen kytketyt nimellisvirta-arvoltaan pienemmät sulakkeet laukeaisivat myös vikatilanteissa.

Varavoimakeskusten välisillä johto-osuuksilla olevien suojalaitteiden toiminta tutkittiin 3-vaiheisen oikosulun vikavirralla.

Vikatarkasteluissa paljastui, että kaikki varavoimaverkkoon kytketyt sulakkeet eivät laukeaisi vikatilanteissa. Varavoimaverkko ei myöskään olisi kaikissa vikatapauksissa selektiivinen, vaan vian seurauksena varavoimaverkosta saattaisi kytkeytyä irti myös terveitä varavoimakeskuksia. Diplomityössä ehdotettiin, että varavoimaverkon vikatar- kasteluista tehtäisiin erillinen selvitystyö.

Diplomityön perusteella Porvoon jalostamolla ryhdyttiin tekemään lisäselvityksiä varavoimaverkon parantamiseksi. Lisäselvityksien perusteella tehtävät parannustoimen- piteet tullaan toteuttamaan seuraavassa Porvoon jalostamon huoltoseisokissa.

LÄHTEET

ABB a, Pienjännitekojeet esite. OF1FI 11-09 Kahvasulakkeet, 2...1600 A gG ja aM -tyypit. [WWW]. [viitattu 13.9.2012]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/\\$file/1SCC317002C1801.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/$file/1SCC317002C1801.pdf).

ABB b, Medium voltage products Fuses esite. [WWW]. [viitattu 26.9.2012]. Saatavissa: [http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/7d4008fa40ce98c9c12577f20038ace0/\\$file/ABB%20Fuses_cat_3405PL202-W3-EN.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/7d4008fa40ce98c9c12577f20038ace0/$file/ABB%20Fuses_cat_3405PL202-W3-EN.pdf)

Bastman, J. Sähkökoneet. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Opintomoniste. 189 s.

Bastman, J. Sähköverkkojen mallintaminen ja analyysi. Tampere. 2012. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Luentomateriaali.

BCP Busarello + Cott + Partner AG. NEPLAN User's Guide V5 Electrical. 2012. Switzerland. NEPLAN verkostolaskentaohjelman tuki.

HITEC Power Protection [WWW]. [Viitattu 27.6.2012] Saatavissa: <http://www.hitecups.com/p3.php?RubriekID=2802>.

Hoevenaars, A., MIRUS International Inc. 2011. Preventing Neutral Circulation Currents when Paralleling Generators. [verkkoartikkeli]. 11 s. [viitattu 27.8.2012]. Saatavissa: <http://www.mirusinternational.com/downloads/DPNL-WP001-A1-Preventing-Neutral-Circulating-Current-when-Paralleling-Generators.pdf>.

IEEE Std 446-1995. 2000. IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications. USA. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 319 s.

Juusti, R. Kehityspäällikkö. Neste Oil Oyj. Sähköpostikeskustelu. 13.7.2012

Kothari, D. P., Nagrath, I. J. 2003. Modern Power System Analysis. Third Edition. New Delhi. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. 694 s.

Lakervi, E., Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki. Otatieto. 285s.

Miettinen, T. 2009. Ecodesign-direktiivi ja sen vaikutukset Suomessa. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 80 s.

Mäkinen, A., Bastman, J., Järventausta, P., Verho, P., Repo, S., Honkapuro, S., Partanen, J. 2009. Sähkösiirtoverkon häiriökeskeytysten aiheuttaman haitan arvioinnissa käytettävien parametrien päivittäminen. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. 53 s.

N-105. 1984. Sähköistyksen yleisspesifikaatio muuntamoasennukset. Porvoo. Neste Oil. 95 s.

Neste Oil Oyj [WWW]. [Viitattu 15.6.2012]. Saatavissa: <http://nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,62>

Nousiainen, K. a, Sähkövoimajärjestelmän perusteet. Tampere 2012. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Opintomoniste. 180 s.

Nousiainen, K. b, Magneettiirit ja muuntajat. Tampere 2012. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Opintomoniste. 134 s.

PILLER Power Systems [WWW, pdf]. [Viitattu 27.6.2012] Saatavissa: <http://www.piller.com/page/uniblockubtd400kva50mva/305>

Pulakka, Erkki. 2012. Sähkösuunnittelija, AGCO Sisu Power. Turku. Puhelinhaastattelu 23.8.2012

SFS ry Suomen standardisoimisliitto [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.6.2012]. Saatavissa: <http://www.sfs.fi/>

SFS 600. 2007. Pienjännitesähköasennukset ja sähkötyöturvallisuus. Helsinki. SFS ry. 664 s.

ST-käsikirja 20. 2005. Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät. Espoo. 1. painos. 2005. Sähkötieto ry. 227 s.

ST-käsikirja 31. 2000. Varavoimalaitokset. Espoo. 3. painos. 2000. Sähkötieto ry. 118 s.

SVT-3411. Sähkövoimajärjestelmän säätö ja käyttö kurssin -luentomateriaalit. 2012. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, sähkötekniikan laitos. Luentomateriaali.

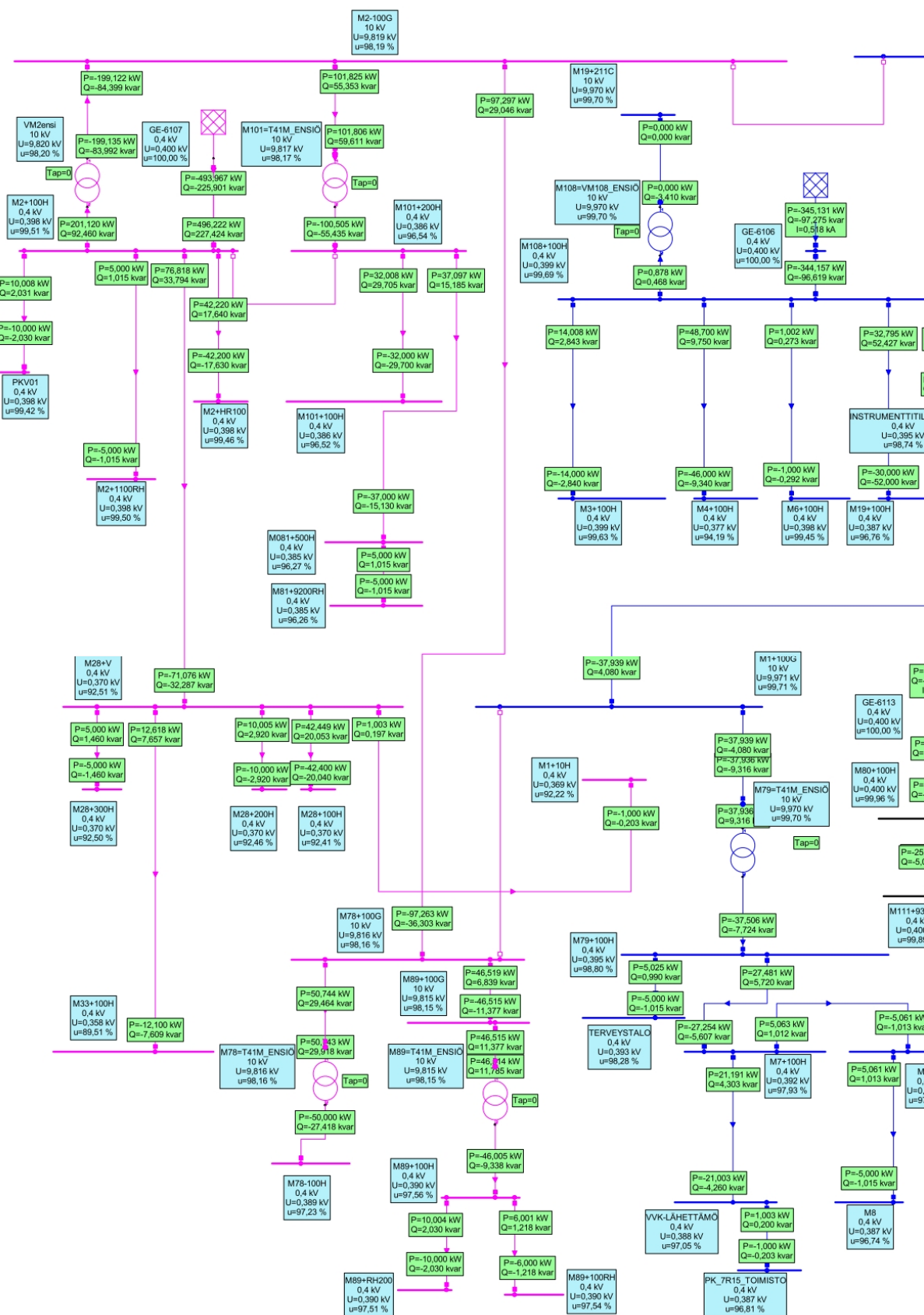
Sähköasennustekniikka 3. 1998. Tampere, Suomen Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto ry. 231 s.

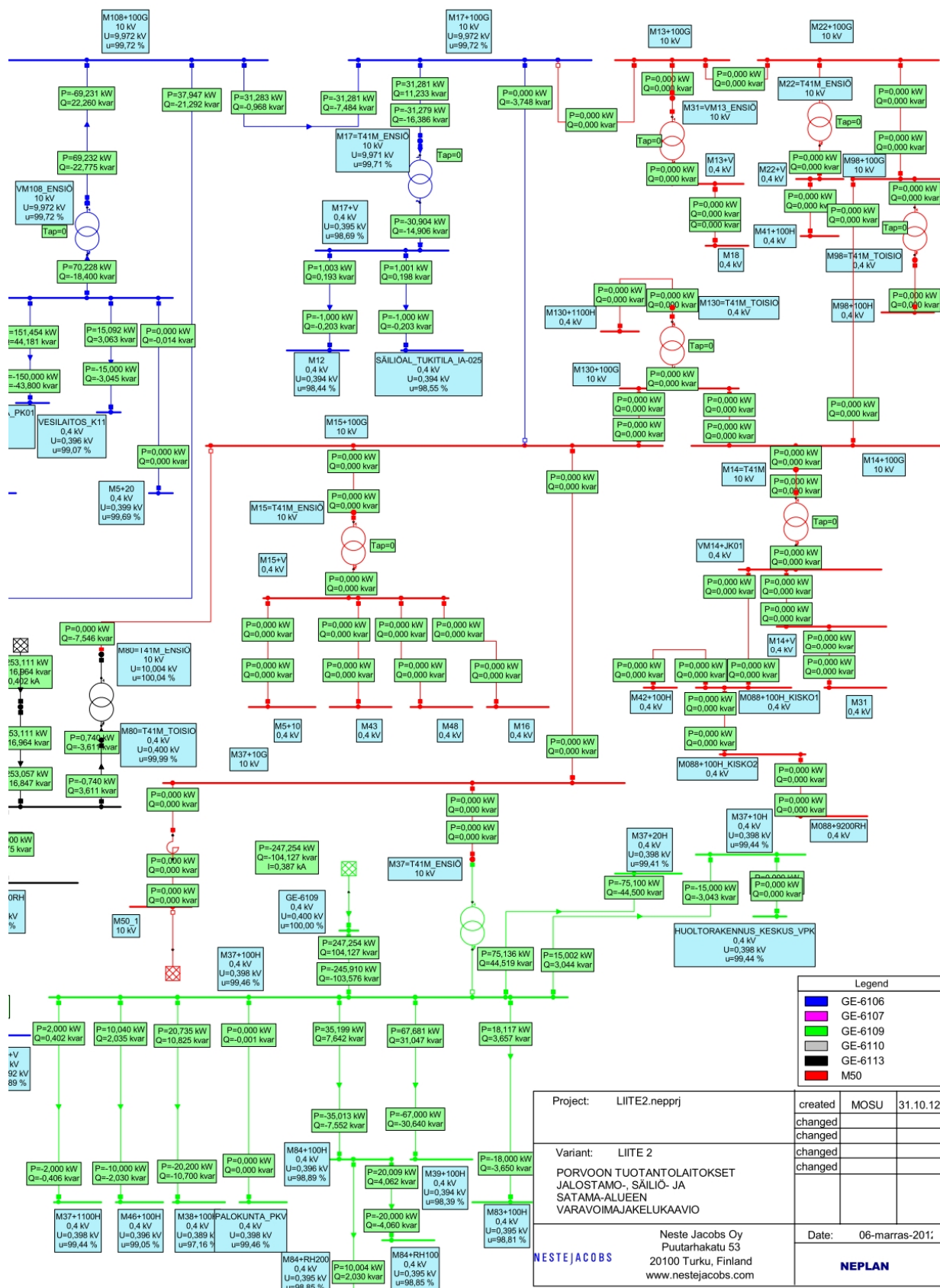
LIITE 1: MUUNTAMON M106 VARAVOIMAVERKON LASKENTA-TULOKSET

Tehonjako								
Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P_{load} [kW]	Q_{load} [kVar]	P_{Gen} [kW]	Q_{Gen} [kVar]	Saarekkeen tunnus
GE-6104	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00	235,20	48,00	GE-6104
M106+100H	0,40	99,88	-0,10	234,90	47,70	0,00	0,00	GE-6104
GE-6105	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00	366,50	75,00	GE-6105
M106+200H	0,40	99,81	-0,10	366,00	74,30	0,00	0,00	GE-6105

1-vaiheinen maasulku								
Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6105	0,40	8,48	-90,00	7,81	2,76	3,77	0,64	GE-6105
M106+200H	0,40	8,24	-86,42	7,61	2,73	3,16	0,63	GE-6105
GE-6104	0,40	8,48	-90,00	7,81	2,76	3,77	0,64	GE-6104
M106+100H	0,40	8,24	-86,42	7,61	2,73	3,16	0,63	GE-6104

3-vaiheinen oikosulku								
Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k'' [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6105	0,40	8,48	270,00	23,99	2,76	11,57	5,88	GE-6105
M106+200H	0,40	8,25	-88,75	22,62	2,73	8,87	5,72	GE-6105
GE-6104	0,40	8,48	270,00	23,99	2,76	11,57	5,88	GE-6104
M106+100H	0,40	8,25	-88,75	22,62	2,73	8,87	5,72	GE-6104





LIITE 3: JALOSTAMO-, SÄILIÖ- JA SATAMA-ALUEEN VARA- VOIMAVERKON LASKENTATULOKSET

Tehonjako

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P _{load} [kW]	Q _{load} [kVar]	P _{Gen} [kW]	Q _{Gen} [kVar]	Saarekkeen tunnus
GE-6106	0,4	100	0	0	0	345,1	97,3	GE-6106
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,4	98,74	0	150	43,8	0	0	GE-6106
M1+100G	9,97	99,71	-0,5	0	0	0	0	GE-6106
M108+100G	9,97	99,72	-0,5	0	0	0	0	GE-6106
M108+100H	0,4	99,69	-0,1	10	2	0	0	GE-6106
M108=VM108_ENSIÖ	9,97	99,7	-0,1	0	0	0	0	GE-6106
M12	0,39	98,44	-0,9	1	0,2	0	0	GE-6106
M17+100G	9,97	99,72	-0,5	0	0	0	0	GE-6106
M17+V	0,4	98,69	-0,9	28,9	14,5	0	0	GE-6106
M17=T41M_ENSIÖ	9,97	99,71	-0,5	0	0	0	0	GE-6106
M19+100H	0,39	96,76	2	30	52	0	0	GE-6106
M19+211C	9,97	99,7	-0,1	0	0	0	0	GE-6106
M3+100H	0,4	99,63	-0,1	14	2,8	0	0	GE-6106
M4+100H	0,38	94,19	0,1	46	9,3	0	0	GE-6106
M5+20	0,4	99,69	-0,1	0	0	0	0	GE-6106
M6+100H	0,4	99,45	0	1	0,3	0	0	GE-6106
M7+100H	0,39	97,93	-1,3	1	0,3	0	0	GE-6106
M7+V	0,39	97,89	-1,3	0	0	0	0	GE-6106
M79+100H	0,4	98,8	-1,2	5	1	0	0	GE-6106
M79=T41M_ENSIÖ	9,97	99,7	-0,5	0	0	0	0	GE-6106
M8	0,39	96,74	-1,2	5	1	0	0	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,39	96,81	-1,3	1	0,2	0	0	GE-6106
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA-025	0,39	98,55	-0,9	1	0,2	0	0	GE-6106
TERVEYSTALO	0,39	98,28	-1,2	5	1	0	0	GE-6106
VESILAITOS_K11	0,4	99,07	-0,1	15	3	0	0	GE-6106
VM108_ENSIÖ	9,97	99,72	-0,5	0	0	0	0	GE-6106
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,39	97,05	-1,3	20	4,1	0	0	GE-6106
GE-6107	0,4	100	0	0	0	496,2	227,4	GE-6107
M081+500H	0,39	96,27	-1,9	32	14,1	0	0	GE-6107
M1+10H	0,37	92,22	0,7	1	0,2	0	0	GE-6107
M101+100H	0,39	96,52	-1,8	32	29,7	0	0	GE-6107
M101+200H	0,39	96,54	-1,8	31,4	10,5	0	0	GE-6107
M101=T41M_ENSIÖ	9,82	98,17	-1	0	0	0	0	GE-6107
M2-100G	9,82	98,19	-1	0	0	0	0	GE-6107
M2+100H	0,4	99,51	0	158,8	79	0	0	GE-6107
M2+1100RH	0,4	99,5	0	5	1	0	0	GE-6107
M2+HR100	0,4	99,46	-0,1	42,2	17,6	0	0	GE-6107
M28+100H	0,37	92,41	0,6	42,4	20	0	0	GE-6107
M28+200H	0,37	92,46	0,6	10	2,9	0	0	GE-6107
M28+300H	0,37	92,5	0,6	5	1,5	0	0	GE-6107

M28+V	0,37	92,51	0,6	0	0	0	0	GE-6107
M33+100H	0,36	89,51	1,5	12,1	7,6	0	0	GE-6107
M78-100H	0,39	97,23	-1,5	50	27,4	0	0	GE-6107
M78+100G	9,82	98,16	-1	0	0	0	0	GE-6107
M78=T41M_ENSIÖ	9,82	98,16	-1	0	0	0	0	GE-6107
M81+9200RH	0,39	96,26	-1,9	5	1	0	0	GE-6107
M89+100G	9,82	98,15	-1	0	0	0	0	GE-6107
M89+100H	0,39	97,56	-1,7	30	6,1	0	0	GE-6107
M89+100RH	0,39	97,54	-1,7	6	1,2	0	0	GE-6107
M89+RH200	0,39	97,51	-1,7	10	2	0	0	GE-6107
M89=T41M_ENSIÖ	9,82	98,15	-1	0	0	0	0	GE-6107
PKV01	0,4	99,42	-0,1	10	2	0	0	GE-6107
VM2ensi	9,82	98,2	-1	0	0	0	0	GE-6107
GE-6109	0,4	100	0	0	0	247,3	104,1	GE-6109
HUOLTORAKENNUS_KESKUS_VPK	0,4	99,44	0	0	0	0	0	GE-6109
M37+100H	0,4	99,46	0	2	0,4	0	0	GE-6109
M37+10H	0,4	99,44	0	15	3	0	0	GE-6109
M37+1100H	0,4	99,44	0	2	0,4	0	0	GE-6109
M37+20H	0,4	99,41	0	75,1	44,5	0	0	GE-6109
M38+100H	0,39	97,16	0,3	20,2	10,7	0	0	GE-6109
M39+100H	0,39	98,39	-0,1	67	30,6	0	0	GE-6109
M46+100H	0,4	99,05	0	10	2	0	0	GE-6109
M83+100H	0,4	98,81	0	18	3,7	0	0	GE-6109
M84+100H	0,4	98,89	-0,1	5	1,5	0	0	GE-6109
M84+RH100	0,4	98,85	-0,1	20	4,1	0	0	GE-6109
M84+RH200	0,4	98,85	-0,1	10	2	0	0	GE-6109
PALOKUNTA_PKV	0,4	99,46	0	0	0	0	0	GE-6109
GE-6113	0,4	100	0	0	0	253,1	117	GE-6113
M111+9300RH	0,4	99,89	0	25	5,1	0	0	GE-6113
M80+100H	0,4	99,96	0	227,3	115,4	0	0	GE-6113
M80=T41M_ENSIÖ	10	100	-0,1	0	0	0	0	GE-6113
M80=T41M_TOISIO	0,4	99,99	0	0	0	0	0	GE-6113
M088+100H_KISKO1	0	0	0	0	0	0	0	M50
M088+100H_KISKO2	0	0	0	0	0	0	0	M50
M088+9200RH	0	0	0	0	0	0	0	M50
M13+100G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M13+V	0	0	0	0	0	0	0	M50
M130+100G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M130+1100H	0	0	0	0	0	0	0	M50
M130=T41M_TOISIO	0	0	0	0	0	0	0	M50
M14+100G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M14+V	0	0	0	0	0	0	0	M50
M14=T41M	0	0	0	0	0	0	0	M50
M15+100G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M15+V	0	0	0	0	0	0	0	M50
M15=T41M_ENSIÖ	0	0	0	0	0	0	0	M50

M16	0	0	0	0	0	0	0	M50
M18	0	0	0	0	0	0	0	M50
M22+100G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M22+V	0	0	0	0	0	0	0	M50
M22=T41M_ENSIÖ	0	0	0	0	0	0	0	M50
M31	0	0	0	0	0	0	0	M50
M31=VM13_ENSIÖ	0	0	0	0	0	0	0	M50
M37+10G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M37=T41M_ENSIÖ	0	0	0	0	0	0	0	M50
M41+100H	0	0	0	0	0	0	0	M50
M42+100H	0	0	0	0	0	0	0	M50
M43	0	0	0	0	0	0	0	M50
M48	0	0	0	0	0	0	0	M50
M5+10	0	0	0	0	0	0	0	M50
M50_1	0	0	0	0	0	0	0	M50
M98+100G	0	0	0	0	0	0	0	M50
M98+100H	0	0	0	0	0	0	0	M50
M98=T41M_TOISIO	0	0	0	0	0	0	0	M50
VM14+JK01	0	0	0	0	0	0	0	M50

1-vaiheinen maasulku

Vika- paikka	U _n [kV]	I _k " [kA]	θ I _k " [°]	i _p [kA]	I _k [kA]	I _{th} [kA]	S _k [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6106	0,40	12,01	-81,80	33,64	2,71	3,70	0,63	GE-6106
M108=VM108_ENSIÖ	10,00	0,00	89,99	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
VESILAITOS_K11	0,40	1,74	-14,35	2,57	1,13	1,13	0,26	GE-6106
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,40	8,02	-44,73	16,06	2,53	2,58	0,59	GE-6106
M108+100H	0,40	12,77	-85,76	33,98	2,75	3,16	0,63	GE-6106
M3+100H	0,40	8,88	-53,87	19,49	2,57	2,64	0,59	GE-6106
M6+100H	0,40	0,30	-5,68	0,43	0,21	0,21	0,05	GE-6106
M4+100H	0,40	0,58	-6,17	0,84	0,41	0,41	0,10	GE-6106
VM108_ENSIÖ	10,00	0,01	89,80	0,02	0,01	0,01	0,05	GE-6106
M19+100H	0,40	0,87	-7,45	1,26	0,61	0,61	0,14	GE-6106
M19+211C	10,00	0,00	89,99	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M1+100G	10,00	0,01	89,76	0,02	0,01	0,01	0,05	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,40	0,28	-8,77	0,40	0,20	0,20	0,05	GE-6106
M79+100H	0,40	2,85	-70,54	5,62	1,49	1,50	0,34	GE-6106
M7+100H	0,40	1,40	-36,81	2,38	0,92	0,92	0,21	GE-6106
TERVEYSTALO	0,40	0,57	-21,82	0,88	0,41	0,41	0,09	GE-6106
M17=T41M_ENSIÖ	10,00	0,01	89,74	0,02	0,01	0,01	0,05	GE-6106
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,40	0,82	-23,67	1,26	0,57	0,57	0,13	GE-6106
M7+V	0,40	1,21	-31,70	1,99	0,81	0,82	0,19	GE-6106
M8	0,40	0,27	-8,90	0,39	0,19	0,20	0,05	GE-6106
M5+20	0,40	1,71	-19,41	2,67	1,10	1,10	0,25	GE-6106
M108+100G	10,00	0,01	89,80	0,02	0,01	0,01	0,05	GE-6106
M17+100G	10,00	0,01	89,77	0,02	0,01	0,01	0,05	GE-6106

M79=T41M_ENSIÖ	10,00	0,01	89,71	0,02	0,01	0,01	0,05	GE-6106
M17+V	0,40	3,16	-70,31	6,22	1,50	1,52	0,35	GE-6106
M12	0,40	0,29	-7,53	0,42	0,21	0,21	0,05	GE-6106
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA-025	0,40	0,50	-11,14	0,73	0,36	0,36	0,08	GE-6106
M2+HR100	0,40	13,51	-68,42	31,39	2,64	2,83	0,61	GE-6107
M2-100G	10,00	0,00	89,91	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
M2+100H	0,40	14,94	-79,44	36,83	2,67	3,08	0,62	GE-6107
M2+1100RH	0,40	13,47	-68,34	31,22	2,64	2,83	0,61	GE-6107
VM2ensi	10,00	0,00	89,91	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
M101+200H	0,40	5,15	-72,64	10,58	1,90	1,93	0,44	GE-6107
M081+500H	0,40	3,93	-55,47	7,51	1,72	1,74	0,40	GE-6107
M28+V	0,40	0,90	-10,80	1,35	0,59	0,59	0,14	GE-6107
M33+100H	0,40	0,25	-6,35	0,37	0,17	0,17	0,04	GE-6107
M89=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,89	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
M78=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,90	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
PKV01	0,40	6,15	-30,27	10,86	2,30	2,33	0,53	GE-6107
M78+100G	10,00	0,00	89,91	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
M89+100G	10,00	0,00	89,90	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
M101+100H	0,40	5,06	-71,19	10,34	1,89	1,92	0,44	GE-6107
M89+100H	0,40	4,03	-75,14	8,51	1,71	1,74	0,40	GE-6107
M78-100H	0,40	5,10	-72,07	10,37	1,84	1,87	0,42	GE-6107
M81+9200RH	0,40	3,79	-53,80	7,19	1,70	1,72	0,39	GE-6107
M101=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,90	0,01	0,00	0,00	0,02	GE-6107
M89+RH200	0,40	3,63	-61,95	7,21	1,65	1,67	0,38	GE-6107
M89+100RH	0,40	3,83	-68,68	7,85	1,68	1,71	0,39	GE-6107
GE-6107	0,40	14,15	-78,21	36,40	2,64	3,60	0,61	GE-6107
M28+300H	0,40	0,88	-10,80	1,33	0,58	0,58	0,13	GE-6107
M28+200H	0,40	0,85	-10,35	1,27	0,56	0,56	0,13	GE-6107
M28+100H	0,40	0,88	-10,75	1,32	0,57	0,58	0,13	GE-6107
M1+10H	0,40	0,26	-4,62	0,38	0,18	0,18	0,04	GE-6107
GE-6109	0,40	4,33	-84,74	10,64	0,84	1,15	0,19	GE-6109
M37+100H	0,40	4,24	-78,85	10,11	0,84	0,95	0,19	GE-6109
M37+20H	0,40	4,20	-77,25	9,91	0,83	0,93	0,19	GE-6109
M37+10H	0,40	4,13	-75,48	9,60	0,83	0,91	0,19	GE-6109
M38+100H	0,40	0,71	-16,15	1,07	0,42	0,42	0,10	GE-6109
M46+100H	0,40	1,43	-27,90	2,29	0,64	0,65	0,15	GE-6109
M37+1100H	0,40	3,46	-56,47	6,98	0,82	0,84	0,19	GE-6109
PALOKUNTA_PKV	0,40	2,56	-39,21	4,49	0,78	0,79	0,18	GE-6109
M84+100H	0,40	2,56	-47,39	4,84	0,77	0,78	0,18	GE-6109
M83+100H	0,40	1,66	-28,56	2,64	0,69	0,70	0,16	GE-6109
M39+100H	0,40	2,87	-50,41	5,66	0,78	0,79	0,18	GE-6109
HUOLTORAKENNUS_KESKUS_VPK	0,40	1,00	-15,56	1,44	0,55	0,55	0,13	GE-6109
M84+RH100	0,40	2,41	-44,52	4,46	0,76	0,77	0,18	GE-6109
M84+RH200	0,40	2,27	-41,36	4,10	0,75	0,76	0,17	GE-6109
M80=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,90	0,00	0,00	0,00	0,01	GE-6113
M80=T41M_TOISIO	0,40	9,01	-65,58	16,38	4,31	4,34	0,99	GE-6113

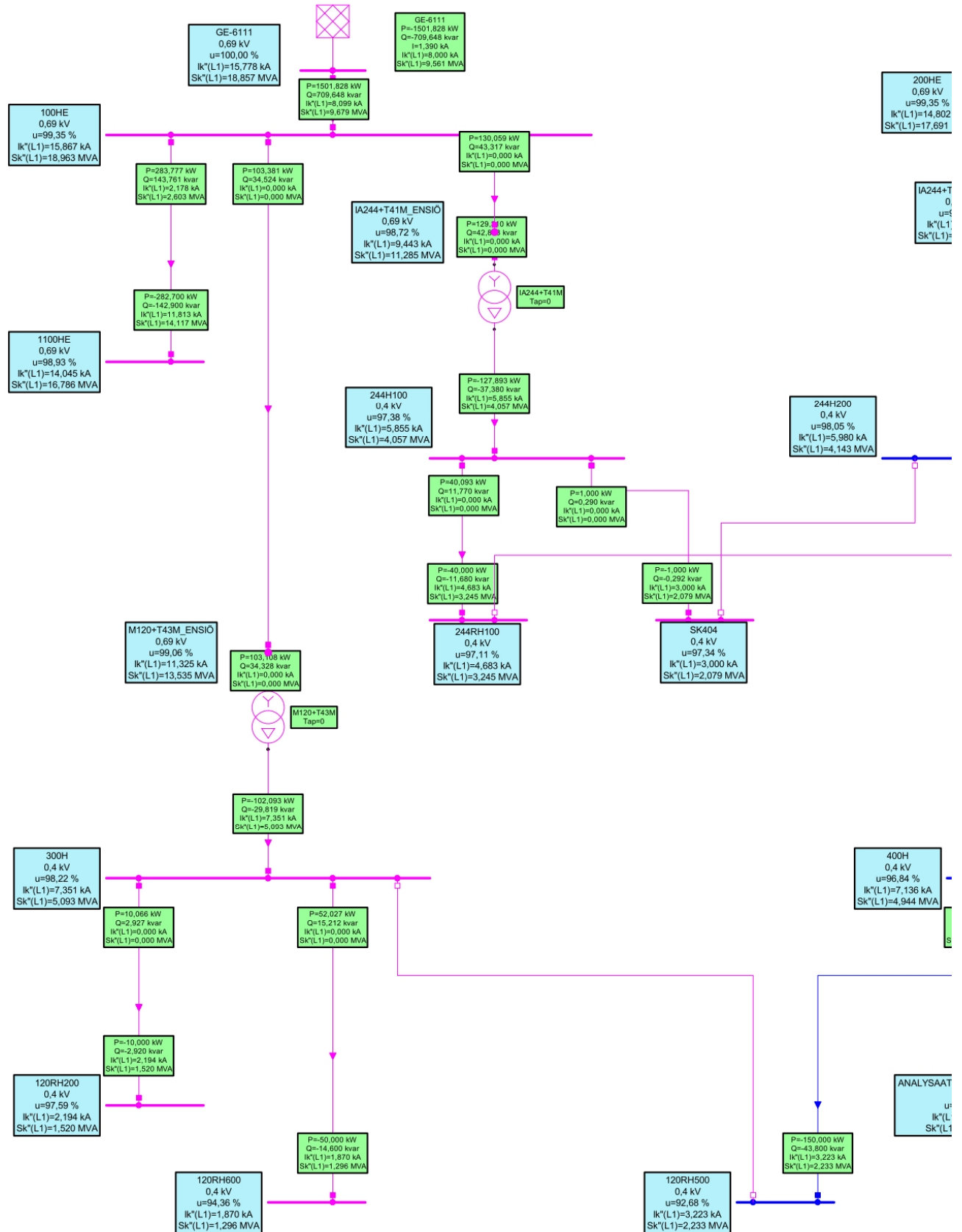
GE-6113	0,40	13,37	-83,13	35,35	4,38	5,98	1,01	GE-6113
M80+100H	0,40	13,42	-80,35	35,28	4,42	6,03	1,02	GE-6113
M111+9300RH	0,40	10,01	-59,82	22,39	3,96	4,05	0,91	GE-6113
M130+100G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M37=T41M_ENSIÖ	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M5+10	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M48	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M16	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M14+V	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M088+100H_KISKO1	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M42+100H	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
VM14+JK01	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M14+100G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M130=T41M_TOISIO	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M130+1100H	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M22+V	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M41+100H	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M31	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M22+100G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M37+10G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M15=T41M_ENSIÖ	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M50_1	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M088+9200RH	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M088+100H_KISKO2	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M14=T41M	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M31=VM13_ENSIÖ	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M98+100G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M22=T41M_ENSIÖ	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M13+V	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M98+100H	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M15+100G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M15+V	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M13+100G	10,00	0	0	0	0	0	0	M50
M18	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M98=T41M_TOISIO	0,40	0	0	0	0	0	0	M50
M43	0,40	0	0	0	0	0	0	M50

3-vaiheinen oikosulku

Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k'' [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6106	0,4	9,78	-89,31	27,4	9,5	11,9	6,777	GE-6106
M108=VM108_ENSIÖ	10	0,24	-83,3	0,59	0,24	0,24	4,172	GE-6106
VESILAITOS_K11	0,4	3,72	-39,19	5,51	3,71	3,73	2,579	GE-6106
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,4	8,32	-72,82	16,7	8,12	8,37	5,763	GE-6106
M108+100H	0,4	9,5	-87,25	25,3	9,21	9,87	6,58	GE-6106
M3+100H	0,4	8,29	-78,17	18,2	8,09	8,36	5,742	GE-6106
M6+100H	0,4	0,82	-17,24	1,18	0,82	0,82	0,566	GE-6106
M4+100H	0,4	1,63	-20,12	2,34	1,62	1,63	1,126	GE-6106
VM108_ENSIÖ	10	0,25	-82,96	0,6	0,24	0,25	4,3	GE-6106
M19+100H	0,4	2,35	-24,48	3,4	2,35	2,36	1,629	GE-6106
M19+211C	10	0,24	-83,2	0,58	0,24	0,24	4,166	GE-6106
M1+100G	10	0,25	-82,04	0,58	0,23	0,25	4,257	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,4	0,55	-19,6	0,8	0,55	0,56	0,384	GE-6106
M79+100H	0,4	2,47	-72,03	4,87	2,43	2,48	1,712	GE-6106
M7+100H	0,4	1,81	-60,51	3,07	1,79	1,81	1,252	GE-6106
TERVEYSTALO	0,4	1,07	-48,92	1,65	1,06	1,07	0,738	GE-6106
M17=T41M_ENSIÖ	10	0,25	-82,29	0,59	0,24	0,25	4,271	GE-6106
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,4	1,38	-48,96	2,13	1,37	1,38	0,956	GE-6106
M7+V	0,4	1,72	-57,27	2,84	1,7	1,73	1,193	GE-6106
M8	0,4	0,63	-23,26	0,91	0,63	0,63	0,436	GE-6106
M5+20	0,4	3,49	-50,55	5,45	3,47	3,5	2,416	GE-6106
M108+100G	10	0,25	-82,94	0,6	0,24	0,25	4,299	GE-6106
M17+100G	10	0,25	-82,53	0,59	0,24	0,25	4,281	GE-6106
M79=T41M_ENSIÖ	10	0,24	-81,69	0,58	0,23	0,25	4,234	GE-6106
M17+V	0,4	2,81	-72,01	5,53	2,47	2,82	1,945	GE-6106
M12	0,4	0,67	-19,49	0,97	0,66	0,68	0,467	GE-6106
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA-025	0,4	1,08	-27,27	1,56	1,04	1,08	0,746	GE-6106
M2+HR100	0,4	12	-78,91	27,9	8,92	11	8,333	GE-6107
M2-100G	10	0,3	-78,66	0,69	0,24	0,28	5,269	GE-6107
M2+100H	0,4	12,6	-81,79	31	9,21	11,5	8,717	GE-6107
M2+1100RH	0,4	12	-78,76	27,8	8,92	10,9	8,298	GE-6107
VM2ensi	10	0,3	-78,71	0,69	0,24	0,28	5,27	GE-6107
M101+200H	0,4	4,25	-73,67	8,74	3,55	4,28	2,947	GE-6107
M081+500H	0,4	3,74	-69,05	7,15	3,2	3,76	2,59	GE-6107
M28+V	0,4	2,53	-34,84	3,81	2,02	2,33	1,754	GE-6107
M33+100H	0,4	0,77	-22,92	1,13	0,64	0,77	0,533	GE-6107
M89=T41M_ENSIÖ	10	0,3	-77,67	0,67	0,23	0,28	5,215	GE-6107
M78=T41M_ENSIÖ	10	0,3	-78,08	0,68	0,23	0,28	5,238	GE-6107
PKV01	0,4	9,24	-61,12	16,3	7,55	9,27	6,399	GE-6107
M78+100G	10	0,3	-78,11	0,68	0,23	0,28	5,24	GE-6107
M89+100G	10	0,3	-77,72	0,67	0,23	0,28	5,217	GE-6107
M101+100H	0,4	4,22	-73,32	8,61	3,53	4,24	2,921	GE-6107
M89+100H	0,4	3,42	-75,52	7,22	3,02	3,44	2,368	GE-6107

M78-100H	0,4	4,35	-73,04	8,84	3,36	3,99	3,015	GE-6107
M81+9200RH	0,4	3,68	-68,52	6,98	3,16	3,69	2,548	GE-6107
M101=T41M_ENSIÖ	10	0,3	-78,4	0,69	0,23	0,28	5,254	GE-6107
M89+RH200	0,4	3,32	-71,86	6,6	2,95	3,33	2,297	GE-6107
M89+100RH	0,4	3,35	-73,72	6,87	2,98	3,37	2,321	GE-6107
GE-6107	0,4	12,8	-83,42	32,9	9,5	11,9	8,846	GE-6107
M28+300H	0,4	2,49	-34,71	3,74	1,99	2,49	1,724	GE-6107
M28+200H	0,4	2,42	-33,58	3,61	1,94	2,42	1,674	GE-6107
M28+100H	0,4	2,48	-34,82	3,74	1,98	2,29	1,721	GE-6107
M1+10H	0,4	0,58	-10,86	0,83	0,54	0,58	0,4	GE-6107
GE-6109	0,4	5,14	-80,59	12,6	3,26	4,5	3,563	GE-6109
M37+100H	0,4	5,15	-79,59	12,3	3,21	4,46	3,566	GE-6109
M37+20H	0,4	5,12	-79,18	12,1	3,19	4,44	3,548	GE-6109
M37+10H	0,4	5,04	-78,36	11,7	3,17	4,38	3,492	GE-6109
M38+100H	0,4	1,77	-38,71	2,69	1,43	1,78	1,228	GE-6109
M46+100H	0,4	2,71	-51,24	4,35	2,19	2,72	1,876	GE-6109
M37+1100H	0,4	4,68	-69,9	9,43	3,08	4,09	3,241	GE-6109
PALOKUNTA_PKV	0,4	4,16	-59,53	7,31	2,93	3,7	2,882	GE-6109
M84+100H	0,4	3,69	-66,14	6,99	2,65	3,31	2,559	GE-6109
M83+100H	0,4	3,06	-49,31	4,86	2,42	2,82	2,122	GE-6109
M39+100H	0,4	4,21	-69,8	8,31	2,72	3,66	2,92	GE-6109
HUOLTORAKENNUS_KESKUS_VPK	0,4	1,84	-24,92	2,66	1,71	1,84	1,275	GE-6109
M84+RH100	0,4	3,6	-64,43	6,65	2,61	3,23	2,492	GE-6109
M84+RH200	0,4	3,54	-62,57	6,39	2,59	3,19	2,451	GE-6109
M80=T41M_ENSIÖ	10	0,2	-68,16	0,38	0,19	0,2	3,487	GE-6113
M80=T41M_TOISIO	0,4	7,2	-64,83	13,1	6,55	7,23	4,99	GE-6113
GE-6113	0,4	14	-85,53	37	11,3	14,5	9,684	GE-6113
M80+100H	0,4	13,9	-85,29	36,5	11,2	14,3	9,608	GE-6113
M111+9300RH	0,4	11,5	-77,58	25,8	9,72	11,6	7,981	GE-6113
M130+100G	10	0	0	0	0	0	0	M50
M37=T41M_ENSIÖ	10	0	0	0	0	0	0	M50
M5+10	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M48	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M16	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M14+V	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M088+100H_KISKO1	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M42+100H	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
VM14+JK01	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M14+100G	10	0	0	0	0	0	0	M50
M130=T41M_TOISIO	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M130+1100H	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M22+V	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M41+100H	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M31	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M22+100G	10	0	0	0	0	0	0	M50
M37+10G	10	0	0	0	0	0	0	M50

M15=T41M_ENSIÖ	10	0	0	0	0	0	0	M50
M50_1	10	0	0	0	0	0	0	M50
M088+9200RH	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M088+100H_KISKO2	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M14=T41M	10	0	0	0	0	0	0	M50
M31=VM13_ENSIÖ	10	0	0	0	0	0	0	M50
M98+100G	10	0	0	0	0	0	0	M50
M22=T41M_ENSIÖ	10	0	0	0	0	0	0	M50
M13+V	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M98+100H	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M15+100G	10	0	0	0	0	0	0	M50
M15+V	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M13+100G	10	0	0	0	0	0	0	M50
M18	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M98=T41M_TOISIO	0,4	0	0	0	0	0	0	M50
M43	0,4	0	0	0	0	0	0	M50

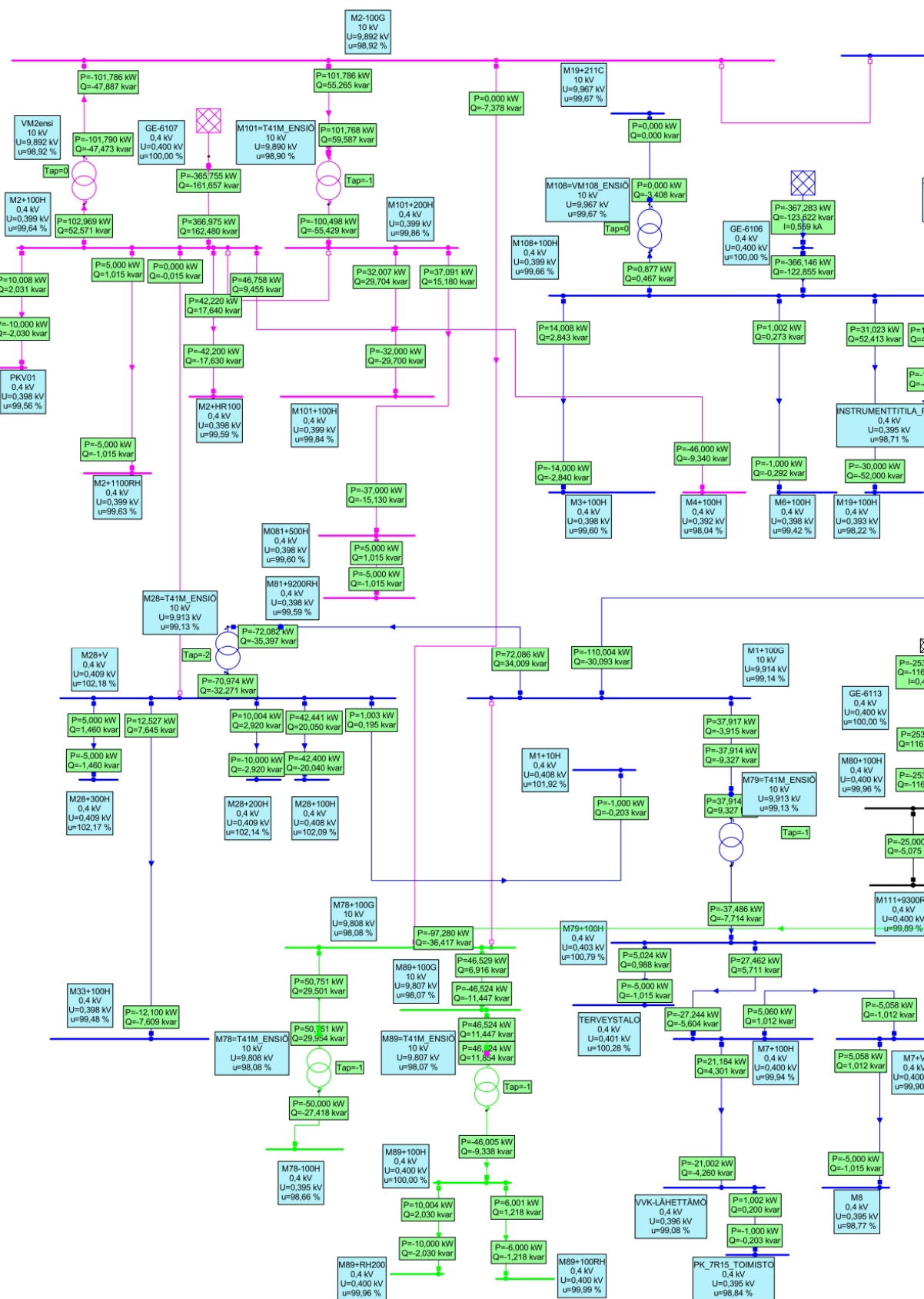


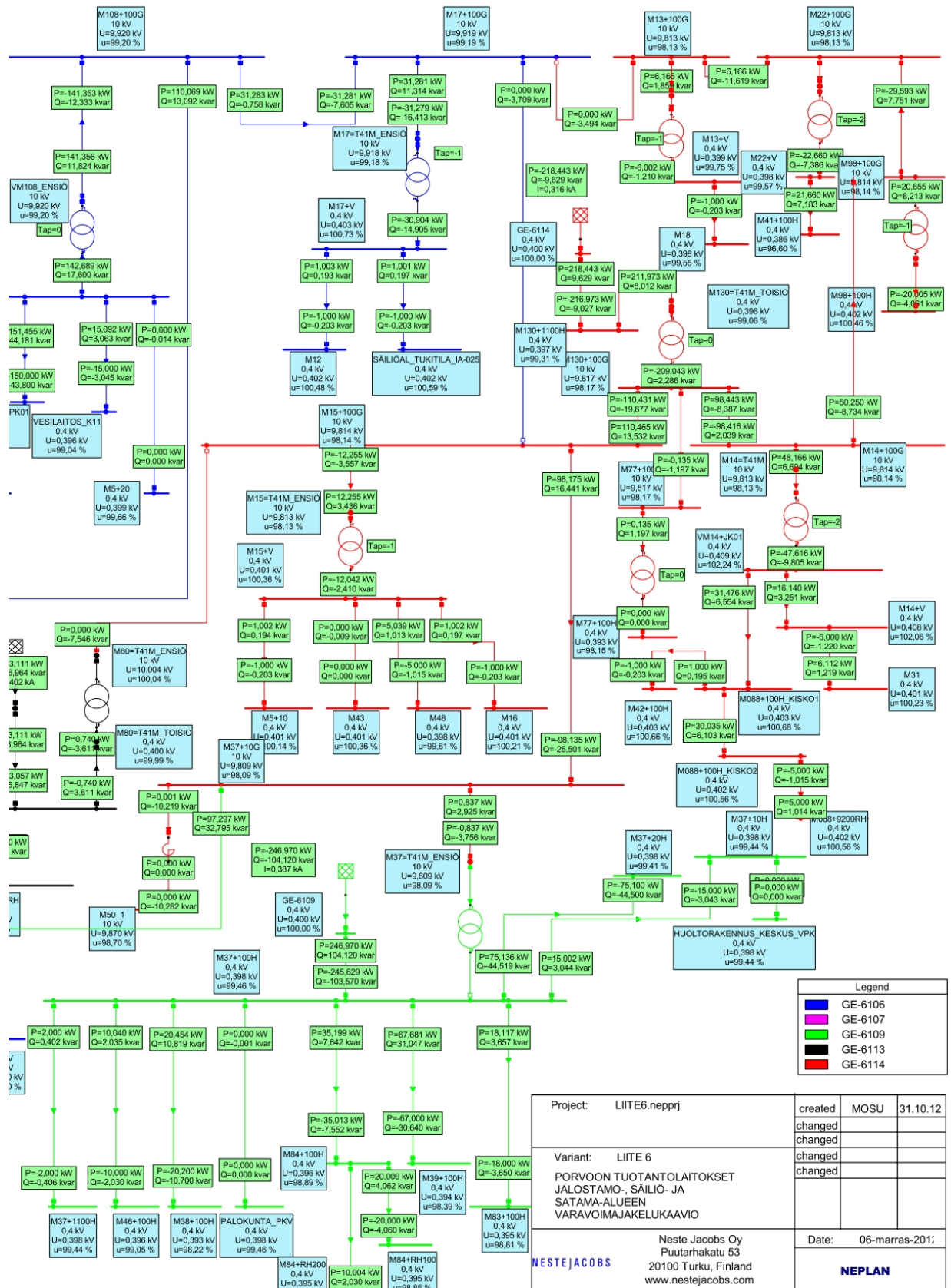
LIITE 5: MUUNTAMON M120 VARAVOIMAVERKON LASKENTA-TULOKSET

Tehonjako								
Solmupisteen	U	u	θ	P_{load}	Q_{load}	P_{Gen}	Q_{Gen}	Saarekkeen
tunnus	[kV]	[%]	[°]	[kW]	[kVar]	[kW]	[kVar]	tunnus
GE-6111	0,69	100,00	0,00	0,00	0,00	1501,80	709,60	GE-6111
100HE	0,69	99,35	-0,40	979,30	474,10	0,00	0,00	GE-6111
1100HE	0,68	98,93	-0,40	282,70	142,90	0,00	0,00	GE-6111
120RH200	0,39	97,59	-1,10	10,00	2,90	0,00	0,00	GE-6111
120RH600	0,38	94,36	-1,10	50,00	14,60	0,00	0,00	GE-6111
244H100	0,39	97,38	-1,60	86,80	25,30	0,00	0,00	GE-6111
244RH100	0,39	97,11	-1,70	40,00	11,70	0,00	0,00	GE-6111
300H	0,39	98,22	-1,10	40,00	11,70	0,00	0,00	GE-6111
IA244+T41M_ENSIÖ	0,68	98,72	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6111
M120+T43M_ENSIÖ	0,68	99,06	-0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6111
SK404	0,39	97,34	-1,60	1,00	0,30	0,00	0,00	GE-6111
GE-6112	0,69	100,00	0,00	0,00	0,00	1513,90	706,10	GE-6112
120RH100	0,39	97,16	-1,70	15,00	3,00	0,00	0,00	GE-6112
120RH500	0,37	92,68	-3,30	150,00	43,80	0,00	0,00	GE-6112
200HE	0,69	99,35	-0,40	762,00	386,00	0,00	0,00	GE-6112
2100HE	0,68	98,95	-0,40	260,00	140,40	0,00	0,00	GE-6112
244H200	0,39	98,05	-1,10	86,80	25,30	0,00	0,00	GE-6112
400H	0,39	96,84	-2,00	40,00	11,70	0,00	0,00	GE-6112
500H	0,39	97,40	-1,60	160,00	46,70	0,00	0,00	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-270	0,39	96,28	-1,90	10,00	2,90	0,00	0,00	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-271	0,38	96,08	-1,90	10,00	2,90	0,00	0,00	GE-6112
IA244+T42M_ENSIÖ	0,68	98,93	-0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6112
M120+T44M_ENSIÖ	0,68	98,72	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6112
M120+T45M_ENSIÖ	0,68	98,85	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6112

1-vaiheinen maasulku								
Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6111	0,69	11,98	-84,20	8,48	3,00	4,09	1,20	GE-6111
100HE	0,69	11,04	-68,88	8,18	2,93	3,46	1,17	GE-6111
1100HE	0,69	8,94	-55,10	7,29	2,78	2,87	1,11	GE-6111
300H	0,40	8,40	-69,57	9,55	4,21	4,26	0,97	GE-6111
120RH200	0,40	0,82	-8,03	0,86	0,59	0,59	0,14	GE-6111
120RH600	0,40	0,76	-10,56	0,80	0,55	0,55	0,13	GE-6111
244RH100	0,40	4,38	-49,19	5,50	2,78	2,79	0,64	GE-6111
244H100	0,40	6,64	-68,70	7,90	3,66	3,69	0,85	GE-6111
SK404	0,40	1,36	-13,67	1,48	0,98	0,98	0,23	GE-6111
M120+T43M_ENSIÖ	0,69	6,86	-55,74	6,23	2,53	2,57	1,01	GE-6111
IA244+T41M_ENSIÖ	0,69	5,02	-34,40	5,29	2,32	2,34	0,92	GE-6111
GE-6112	0,69	11,59	-84,41	8,48	3,00	4,09	1,20	GE-6112
IA244+T42M_ENSIÖ	0,69	4,97	-35,11	5,29	2,32	2,34	0,92	GE-6112
M120+T44M_ENSIÖ	0,69	6,74	-56,39	6,23	2,53	2,57	1,01	GE-6112
M120+T45M_ENSIÖ	0,69	6,74	-56,39	6,23	2,53	2,57	1,01	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-271	0,40	0,69	-7,36	0,72	0,50	0,50	0,12	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-270	0,40	0,92	-8,86	0,97	0,66	0,67	0,15	GE-6112
200HE	0,69	10,70	-69,52	8,18	2,93	3,46	1,17	GE-6112
2100HE	0,69	8,73	-55,92	7,29	2,78	2,87	1,11	GE-6112
400H	0,40	8,18	-69,92	9,47	4,18	4,22	0,97	GE-6112
120RH500	0,40	2,10	-30,43	2,60	1,48	1,49	0,34	GE-6112
500H	0,40	8,24	-69,56	9,49	4,20	4,24	0,97	GE-6112
244H200	0,40	6,84	-67,99	8,08	3,76	3,79	0,87	GE-6112
120RH100	0,40	2,95	-34,95	3,71	2,01	2,02	0,47	GE-6112

3-vaiheinen oikosulku								
Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k'' [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6111	0,69	15,78	-78,48	36,94	8,00	12,72	18857,10	GE-6111
100HE	0,69	15,87	-77,46	36,33	7,66	12,54	18963,10	GE-6111
1100HE	0,69	14,05	-71,90	28,93	7,12	11,23	16785,80	GE-6111
300H	0,40	7,35	-68,91	14,06	5,81	6,78	5093,10	GE-6111
120RH200	0,40	2,19	-24,10	3,17	2,14	2,20	1519,70	GE-6111
120RH600	0,40	1,87	-28,61	2,71	1,82	1,87	1295,80	GE-6111
244RH100	0,40	4,68	-62,83	8,24	4,05	4,70	3244,80	GE-6111
244H100	0,40	5,86	-67,40	10,93	4,85	5,88	4056,60	GE-6111
SK404	0,40	3,00	-34,99	4,39	2,84	3,01	2078,50	GE-6111
M120+T43M_ENSIÖ	0,69	11,33	-64,27	20,97	6,63	9,50	13534,50	GE-6111
IA244+T41M_ENSIÖ	0,69	9,44	-57,77	16,15	6,07	8,16	11285,00	GE-6111
GE-6112	0,69	14,81	-79,23	35,16	8,00	12,23	17699,30	GE-6112
IA244+T42M_ENSIÖ	0,69	9,10	-59,01	15,78	6,07	7,96	10875,80	GE-6112
M120+T44M_ENSIÖ	0,69	10,81	-65,45	20,33	6,63	9,21	12916,90	GE-6112
M120+T45M_ENSIÖ	0,69	10,81	-65,45	20,33	6,63	9,21	12916,90	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-271	0,40	1,90	-22,50	2,74	1,86	1,90	1314,00	GE-6112
ANALYSAATTORISUOJA IA-270	0,40	2,41	-26,17	3,48	2,34	2,41	1666,80	GE-6112
200HE	0,69	14,80	-78,22	34,38	7,66	12,01	17690,50	GE-6112
2100HE	0,69	13,21	-72,84	27,64	7,12	10,81	15791,40	GE-6112
400H	0,40	7,14	-69,35	13,74	5,76	7,17	4943,80	GE-6112
120RH500	0,40	3,22	-55,94	5,27	2,96	3,23	2233,10	GE-6112
500H	0,40	7,21	-68,96	13,80	5,80	7,24	4991,90	GE-6112
244H200	0,40	5,98	-66,85	11,10	5,00	6,01	4143,20	GE-6112
120RH100	0,40	4,05	-58,36	6,79	3,62	4,06	2805,60	GE-6112





LIITE 7: JALOSTAMO-, SÄILIÖ- JA SATAMA-ALUEEN VARA- VOIMAVERKON LASKENTATULOKSET PARANNUSEHDOTUK- SILLA

Tehonjako

Solmupisteen tunnus	U [kV]	u [%]	θ [°]	P _{load} [kW]	Q _{load} [kVar]	P _{Gen} [kW]	Q _{Gen} [kVar]	Saarekkeen tunnus
GE-6106	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00	367,30	118,90	GE-6106
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,40	98,71	0,00	150,00	43,80	0,00	0,00	GE-6106
M1+100G	9,92	99,18	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M1+10H	0,41	101,97	-1,80	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6106
M108+100G	9,92	99,24	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M108+100H	0,40	99,66	-0,10	10,00	2,00	0,00	0,00	GE-6106
M108=VM108_ENSIÖ	9,97	99,67	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M12	0,40	100,53	-1,20	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6106
M17+100G	9,92	99,24	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M17+V	0,40	100,78	-1,30	28,90	14,50	0,00	0,00	GE-6106
M17=T41M_ENSIÖ	9,92	99,23	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M19+100H	0,39	98,22	0,60	30,00	52,00	0,00	0,00	GE-6106
M19+211C	9,97	99,67	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M28+100H	0,41	102,14	-1,80	42,40	20,00	0,00	0,00	GE-6106
M28+200H	0,41	102,19	-1,80	10,00	2,90	0,00	0,00	GE-6106
M28+300H	0,41	102,22	-1,80	5,00	1,50	0,00	0,00	GE-6106
M28+V	0,41	102,23	-1,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M28=T41M_ensiö	9,92	99,18	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M3+100H	0,40	99,60	-0,10	14,00	2,80	0,00	0,00	GE-6106
M33+100H	0,40	99,53	-1,10	12,10	7,60	0,00	0,00	GE-6106
M5+20	0,40	99,66	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M6+100H	0,40	99,43	0,00	1,00	0,30	0,00	0,00	GE-6106
M7+100H	0,40	99,99	-1,60	1,00	0,30	0,00	0,00	GE-6106
M7+V	0,40	99,95	-1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M79+100H	0,40	100,84	-1,50	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6106
M79=T41M_ENSIÖ	9,92	99,18	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M8	0,40	98,82	-1,60	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,40	98,89	-1,60	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6106
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA- 025	0,40	100,64	-1,30	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6106
TERVEYSTALO	0,40	100,33	-1,60	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6106
VESILAITOS_K11	0,40	99,04	-0,10	15,00	3,00	0,00	0,00	GE-6106
VM108_ENSIÖ	9,93	99,25	-0,80	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,40	99,13	-1,70	20,00	4,10	0,00	0,00	GE-6106
GE-6107	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00	367,00	162,50	GE-6107
M101+100H	0,40	99,84	-1,30	32,00	29,70	0,00	0,00	GE-6107
M101+200H	0,40	99,86	-1,30	31,40	10,50	0,00	0,00	GE-6107
M101=T41M_ENSIÖ	9,89	98,90	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6107
M2-100G	9,89	98,92	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6107
M2+100H	0,40	99,64	0,00	158,80	79,00	0,00	0,00	GE-6107

M2+1100RH	0,40	99,63	0,00	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6107
M2+HR100	0,40	99,59	0,00	42,20	17,60	0,00	0,00	GE-6107
M4+100H	0,39	98,04	0,00	46,00	9,30	0,00	0,00	GE-6107
M81+500H	0,40	99,60	-1,30	32,00	14,10	0,00	0,00	GE-6107
M81+9200RH	0,40	99,59	-1,30	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6107
PKV01	0,40	99,56	0,00	10,00	2,00	0,00	0,00	GE-6107
VM2ensi	9,89	98,92	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6107
GE-6109	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00	346,60	141,30	GE-6109
HUOLTOR._KESKUS_VPK	0,40	99,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
M37+100H	0,40	99,24	0,00	2,00	0,40	0,00	0,00	GE-6109
M37+10G	9,87	98,70	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
M37+10H	0,40	99,23	0,00	15,00	3,00	0,00	0,00	GE-6109
M37+1100H	0,40	99,23	0,00	2,00	0,40	0,00	0,00	GE-6109
M37+20H	0,40	99,20	0,00	75,10	44,50	0,00	0,00	GE-6109
M37=T41M_ENSIÖ	9,87	98,71	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
M38+100H	0,39	98,00	0,00	20,20	10,70	0,00	0,00	GE-6109
M39+100H	0,39	98,17	-0,10	67,00	30,60	0,00	0,00	GE-6109
M46+100H	0,40	98,83	0,00	10,00	2,00	0,00	0,00	GE-6109
M78-100H	0,40	99,28	-0,90	50,00	27,40	0,00	0,00	GE-6109
M78+100G	9,87	98,69	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
M78=T41M_ENSIÖ	9,87	98,69	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
M83+100H	0,39	98,59	0,00	18,00	3,70	0,00	0,00	GE-6109
M84+100H	0,40	98,67	-0,10	5,00	1,50	0,00	0,00	GE-6109
M84+RH100	0,40	98,63	-0,10	20,00	4,10	0,00	0,00	GE-6109
M84+RH200	0,40	98,63	-0,10	10,00	2,00	0,00	0,00	GE-6109
M89+100G	9,87	98,68	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
M89+100H	0,39	98,09	-1,10	30,00	6,10	0,00	0,00	GE-6109
M89+100RH	0,39	98,08	-1,10	6,00	1,20	0,00	0,00	GE-6109
M89+RH200	0,39	98,05	-1,10	10,00	2,00	0,00	0,00	GE-6109
M89=T41M_ENSIÖ	9,87	98,68	-0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
PALOKUNTA_PKV	0,40	99,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6109
GE-6113	0,40	100,00	0,00	0,00	0,00	253,10	117,00	GE-6113
M111+9300RH	0,40	99,89	0,00	25,00	5,10	0,00	0,00	GE-6113
M80+100H	0,40	99,96	0,00	227,30	115,40	0,00	0,00	GE-6113
M80=T41M_ENSIÖ	10,00	100,04	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6113
M80=T41M_TOISIO	0,40	99,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6113
GE-6114	0,40	100,00	0,00	0,00	28,50	117,80	0,00	GE-6114
M088+100H_KISKO1	0,41	101,83	-2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M088+100H_KISKO2	0,41	101,71	-2,20	25,00	5,10	0,00	0,00	GE-6114
M088+9200RH	0,41	101,70	-2,20	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6114
M13+100G	10,44	104,41	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M13+V	0,41	103,54	-1,60	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6114
M130+100G	10,44	104,44	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M130+1100H	0,40	99,67	-0,10	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6114
M130=T41M_TOISIO	0,40	99,57	-0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M14+100G	10,44	104,42	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114

M14+V	0,41	103,19	-1,90	10,00	2,00	0,00	0,00	GE-6114
M14=T41M	10,44	104,41	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M15+100G	10,44	104,44	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M15+V	0,42	104,16	-1,40	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6114
M15=T41M_ENSIÖ	10,44	104,44	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M16	0,42	104,01	-1,30	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6114
M18	0,41	103,35	-1,60	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6114
M22+100G	10,44	104,41	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M22+V	0,40	100,73	-2,60	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6114
M22=T41M_ENSIÖ	10,44	104,41	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M31	0,41	101,37	-1,80	6,00	1,20	0,00	0,00	GE-6114
M31=VM13_ENSIÖ	10,44	104,41	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M41+100H	0,39	97,79	-2,50	21,00	7,00	0,00	0,00	GE-6114
M42+100H	0,41	101,80	-2,20	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6114
M43	0,42	104,16	-1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M48	0,41	103,43	-1,30	5,00	1,00	0,00	0,00	GE-6114
M5+10	0,42	103,95	-1,30	1,00	0,20	0,00	0,00	GE-6114
M77+100G	10,44	104,44	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M77+100H	0,42	104,42	-1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M98+100G	10,44	104,41	-1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
M98+100H	0,42	104,23	-1,30	20,00	4,10	0,00	0,00	GE-6114
M98=T41M_TOISIO	0,42	104,25	-1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114
VM14+JK01	0,41	103,36	-1,90	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6114

1-vaiheinen maasulku

Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6106	0,40	12,42	-80,68	7,67	2,71	3,70	0,63	GE-6106
M28=T41M_ensiö	10,00	0,01	89,71	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106
M108=VM108_ENSIÖ	10,00	0,00	89,99	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
M28+V	0,40	3,40	-69,28	3,43	1,50	1,52	0,35	GE-6106
VESILAITOS_K11	0,40	1,74	-14,01	2,00	1,13	1,13	0,26	GE-6106
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,40	8,12	-43,33	6,35	2,53	2,58	0,59	GE-6106
M33+100H	0,40	0,33	-8,89	0,33	0,23	0,23	0,05	GE-6106
M108+100H	0,40	13,31	-84,80	7,65	2,75	3,16	0,63	GE-6106
M3+100H	0,40	9,04	-52,46	6,67	2,57	2,64	0,59	GE-6106
M6+100H	0,40	0,30	-5,62	0,31	0,21	0,21	0,05	GE-6106
VM108_ENSIÖ	10,00	0,01	89,74	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106
M19+100H	0,40	2,21	-18,83	2,63	1,35	1,36	0,31	GE-6106
M1+100G	10,00	0,01	89,73	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106
M19+211C	10,00	0,00	89,99	0,00	0,00	0,00	0,00	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,40	0,28	-8,64	0,29	0,20	0,20	0,05	GE-6106
M79+100H	0,40	2,91	-69,90	3,39	1,49	1,50	0,34	GE-6106
TERVEYSTALO	0,40	0,57	-21,56	0,66	0,41	0,41	0,09	GE-6106
M7+100H	0,40	1,41	-36,22	1,76	0,92	0,92	0,21	GE-6106
M17=T41M_ENSIÖ	10,00	0,01	89,67	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106

VVK-LÄHETTÄMÖ	0,40	0,82	-23,29	0,95	0,57	0,57	0,13	GE-6106
M7+V	0,40	1,21	-31,16	1,50	0,81	0,82	0,19	GE-6106
M8	0,40	0,27	-8,77	0,28	0,19	0,20	0,05	GE-6106
M5+20	0,40	1,71	-19,08	2,07	1,10	1,10	0,25	GE-6106
M108+100G	10,00	0,01	89,75	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106
M17+100G	10,00	0,01	89,71	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106
M79=T41M_ENSIÖ	10,00	0,01	89,67	0,03	0,01	0,01	0,06	GE-6106
M17+V	0,40	3,22	-69,67	3,44	1,50	1,52	0,35	GE-6106
M12	0,40	0,29	-7,42	0,30	0,21	0,21	0,05	GE-6106
M28+300H	0,40	3,29	-66,53	3,35	1,48	1,50	0,34	GE-6106
M28+100H	0,40	3,26	-64,96	3,31	1,48	1,49	0,34	GE-6106
M28+200H	0,40	3,06	-58,59	3,18	1,44	1,46	0,33	GE-6106
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA-025	0,40	0,50	-10,94	0,53	0,36	0,36	0,08	GE-6106
M1+10H	0,40	0,35	-7,54	0,36	0,25	0,25	0,06	GE-6106
M2+HR100	0,40	12,81	-70,44	7,22	2,64	2,83	0,61	GE-6107
M2-100G	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6107
M2+100H	0,40	14,00	-81,00	7,44	2,67	3,08	0,62	GE-6107
M2+1100RH	0,40	12,77	-70,36	7,22	2,64	2,83	0,61	GE-6107
VM2ensi	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6107
M101+200H	0,40	4,93	-73,67	4,70	1,90	1,93	0,44	GE-6107
M81+500H	0,40	3,82	-56,79	4,01	1,72	1,74	0,40	GE-6107
M4+100H	0,40	1,86	-11,05	2,18	1,20	1,21	0,28	GE-6107
PKV01	0,40	6,10	-31,89	5,58	2,30	2,33	0,53	GE-6107
M101+100H	0,40	4,85	-72,26	4,65	1,89	1,92	0,44	GE-6107
M81+9200RH	0,40	3,69	-55,13	3,92	1,70	1,72	0,39	GE-6107
M101=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6107
GE-6107	0,40	13,38	-79,91	7,47	2,64	3,60	0,61	GE-6107
M37=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6109
GE-6109	0,40	10,93	-77,85	8,20	2,90	3,96	0,67	GE-6109
M37+10G	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6109
M37+100H	0,40	11,58	-79,49	7,96	2,93	3,10	0,68	GE-6109
M37+20H	0,40	11,21	-75,06	7,83	2,91	3,05	0,67	GE-6109
M37+10H	0,40	10,70	-70,68	7,69	2,89	3,00	0,67	GE-6109
M89=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,93	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6109
M37+1100H	0,40	6,22	-36,09	6,03	2,55	2,58	0,59	GE-6109
M46+100H	0,40	1,62	-17,13	1,90	1,08	1,08	0,25	GE-6109
M38+100H	0,40	1,27	-17,55	1,45	0,84	0,84	0,19	GE-6109
PALOKUNTA_PKV	0,40	3,43	-20,29	3,99	1,93	1,95	0,45	GE-6109
M78=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6109
M84+100H	0,40	3,65	-31,06	4,21	1,94	1,95	0,45	GE-6109
M39+100H	0,40	4,28	-32,90	4,61	2,07	2,09	0,48	GE-6109
M83+100H	0,40	1,93	-15,83	2,23	1,26	1,26	0,29	GE-6109
HUOLTORAKENNUS_KESKUS_VPK	0,40	1,06	-7,47	1,10	0,74	0,74	0,17	GE-6109
M84+RH100	0,40	3,30	-28,53	3,88	1,83	1,84	0,42	GE-6109
M78+100G	10,00	0,00	89,94	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6109
M89+100G	10,00	0,00	89,93	0,01	0,00	0,00	0,01	GE-6109

M84+RH200	0,40	3,00	-25,70	3,57	1,72	1,74	0,40	GE-6109
M89+100H	0,40	3,76	-75,41	4,40	1,82	1,85	0,42	GE-6109
M78-100H	0,40	4,74	-72,56	4,69	1,96	1,98	0,45	GE-6109
M89+100RH	0,40	3,59	-69,34	4,22	1,78	1,81	0,41	GE-6109
M89+RH200	0,40	3,42	-62,97	4,03	1,75	1,76	0,40	GE-6109
M80=T41M_TOISIO	0,40	9,01	-65,58	9,10	4,31	4,34	0,99	GE-6113
M80=T41M_ENSIÖ	10,00	0,00	89,90	0,00	0,00	0,00	0,01	GE-6113
GE-6113	0,40	13,37	-83,13	12,40	4,38	5,98	1,01	GE-6113
M80+100H	0,40	13,42	-80,35	12,47	4,42	6,03	1,02	GE-6113
M111+9300RH	0,40	10,01	-59,82	10,16	3,96	4,05	0,91	GE-6113
M130+100G	10,00	0,01	89,23	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M5+10	0,40	0,32	-11,22	0,34	0,22	0,23	0,05	GE-6114
M16	0,40	0,46	-14,98	0,50	0,32	0,32	0,07	GE-6114
M48	0,40	0,45	-14,93	0,50	0,31	0,32	0,07	GE-6114
M14+V	0,40	1,80	-58,86	1,93	0,85	0,86	0,20	GE-6114
VM14+JK01	0,40	2,05	-73,41	2,14	0,89	0,90	0,21	GE-6114
M088+100H_KISKO1	0,40	0,95	-37,97	1,17	0,58	0,58	0,13	GE-6114
M42+100H	0,40	0,71	-30,42	0,87	0,46	0,47	0,11	GE-6114
M14+100G	10,00	0,01	89,22	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M130=T41M_TOISIO	0,40	4,35	-83,51	3,26	1,20	1,28	0,28	GE-6114
M130+1100H	0,40	4,37	-82,63	3,30	1,20	1,30	0,28	GE-6114
M22+V	0,40	0,79	-58,73	0,88	0,46	0,46	0,11	GE-6114
M41+100H	0,40	0,39	-29,12	0,40	0,25	0,25	0,06	GE-6114
M31	0,40	0,23	-8,70	0,24	0,16	0,16	0,04	GE-6114
M22+100G	10,00	0,01	89,19	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
GE-6114	0,40	4,20	-82,28	3,35	1,19	1,62	0,27	GE-6114
M15=T41M_ENSIÖ	10,00	0,01	89,17	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M088+9200RH	0,40	0,89	-36,22	1,10	0,55	0,55	0,13	GE-6114
M088+100H_KISKO2	0,40	0,91	-36,53	1,12	0,56	0,56	0,13	GE-6114
M14=T41M	10,00	0,01	89,17	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M77+100G	10,00	0,01	88,83	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M77+100H	0,40	1,49	-34,02	1,49	0,84	0,84	0,19	GE-6114
M31=VM13_ENSIÖ	10,00	0,01	89,11	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M98+100G	10,00	0,01	89,21	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M22=T41M_ENSIÖ	10,00	0,01	89,15	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M13+V	0,40	0,70	-58,38	0,88	0,46	0,46	0,11	GE-6114
M98+100H	0,40	2,79	-76,73	2,60	1,02	1,04	0,24	GE-6114
M15+100G	10,00	0,01	89,18	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M15+V	0,40	2,02	-73,69	2,13	0,88	0,90	0,20	GE-6114
M13+100G	10,00	0,01	89,16	0,04	0,02	0,02	0,09	GE-6114
M18	0,40	0,28	-21,91	0,31	0,20	0,20	0,05	GE-6114
M98=T41M_TOISIO	0,40	2,85	-79,30	2,64	1,03	1,05	0,24	GE-6114
M43	0,40	0,32	-11,22	0,34	0,22	0,23	0,05	GE-6114

3-vaiheinen oikosulku

Vika- paikka	U_n [kV]	I_k'' [kA]	$\theta I_k''$ [°]	i_p [kA]	I_k [kA]	I_{th} [kA]	S_k'' [MVA]	Syöttävä generaattori
GE-6106	0,40	10,22	-88,25	28,20	9,50	11,19	7,08	GE-6106
M28=T41M_ensiö	10,00	0,27	-80,68	0,62	0,23	0,27	4,60	GE-6106
M108=VM108_ENSIÖ	10,00	0,25	-82,56	0,60	0,24	0,25	4,29	GE-6106
M28+V	0,40	3,10	-70,78	6,02	2,47	2,86	2,15	GE-6106
VESILAITOS_K11	0,40	3,75	-38,18	5,53	3,71	3,76	2,60	GE-6106
INSTRUMENTTITILA_PK01	0,40	8,62	-71,39	17,02	8,12	8,66	5,97	GE-6106
M33+100H	0,40	0,88	-27,73	1,30	0,76	0,89	0,61	GE-6106
M108+100H	0,40	9,95	-86,25	26,11	9,21	10,26	6,89	GE-6106
M3+100H	0,40	8,60	-76,95	18,63	8,09	8,67	5,96	GE-6106
M6+100H	0,40	0,82	-17,00	1,18	0,82	0,82	0,57	GE-6106
VM108_ENSIÖ	10,00	0,27	-81,64	0,64	0,24	0,27	4,64	GE-6106
M19+100H	0,40	4,39	-48,74	6,79	4,30	4,40	3,04	GE-6106
M1+100G	10,00	0,27	-80,78	0,62	0,23	0,27	4,60	GE-6106
M19+211C	10,00	0,25	-82,46	0,59	0,24	0,25	4,29	GE-6106
PK_7R15_TOIMISTO	0,40	0,56	-19,20	0,80	0,55	0,56	0,38	GE-6106
M79+100H	0,40	2,54	-71,24	4,97	2,43	2,56	1,76	GE-6106
TERVEYSTALO	0,40	1,08	-48,34	1,66	1,06	1,08	0,74	GE-6106
M7+100H	0,40	1,84	-59,71	3,11	1,79	1,85	1,28	GE-6106
M17=T41M_ENSIÖ	10,00	0,27	-80,92	0,62	0,24	0,27	4,61	GE-6106
VVK-LÄHETTÄMÖ	0,40	1,40	-48,21	2,15	1,37	1,40	0,97	GE-6106
M7+V	0,40	1,75	-56,46	2,87	1,70	1,76	1,21	GE-6106
M8	0,40	0,63	-22,82	0,91	0,63	0,63	0,44	GE-6106
M5+20	0,40	3,52	-49,69	5,48	3,47	3,53	2,44	GE-6106
M108+100G	10,00	0,27	-81,61	0,64	0,24	0,27	4,64	GE-6106
M17+100G	10,00	0,27	-81,18	0,63	0,24	0,27	4,62	GE-6106
M79=T41M_ENSIÖ	10,00	0,26	-80,40	0,61	0,23	0,27	4,57	GE-6106
M17+V	0,40	2,88	-71,20	5,63	2,47	2,90	2,00	GE-6106
M12	0,40	0,68	-19,09	0,97	0,66	0,68	0,47	GE-6106
M28+300H	0,40	3,05	-69,93	5,85	2,44	2,82	2,11	GE-6106
M28+100H	0,40	3,06	-69,71	5,84	2,43	2,82	2,12	GE-6106
M28+200H	0,40	3,00	-67,59	5,57	2,41	3,02	2,08	GE-6106
SÄILIÖAL_TUKITILA_IA-025	0,40	1,08	-26,64	1,56	1,04	1,08	0,75	GE-6106
M1+10H	0,40	0,65	-15,28	0,94	0,64	0,65	0,45	GE-6106
M2+HR100	0,40	11,13	-80,81	26,46	8,92	11,27	7,71	GE-6107
M2-100G	10,00	0,27	-80,33	0,64	0,24	0,28	4,75	GE-6107
M2+100H	0,40	11,58	-83,53	29,18	9,21	10,89	8,02	GE-6107
M2+1100RH	0,40	11,08	-80,66	26,30	8,92	11,23	7,68	GE-6107
VM2ensi	10,00	0,27	-80,38	0,64	0,24	0,28	4,75	GE-6107
M101+200H	0,40	4,03	-74,87	8,40	3,55	4,05	2,79	GE-6107
M81+500H	0,40	3,57	-70,34	6,92	3,20	3,59	2,47	GE-6107
M4+100H	0,40	4,59	-32,79	6,70	4,41	4,59	3,18	GE-6107
PKV01	0,40	8,79	-63,57	15,82	7,55	8,82	6,09	GE-6107

M101+100H	0,40	3,99	-74,54	8,28	3,53	4,02	2,77	GE-6107
M81+9200RH	0,40	3,51	-69,81	6,76	3,16	3,53	2,43	GE-6107
M101=T41M_ENSIÖ	10,00	0,27	-80,09	0,63	0,23	0,28	4,74	GE-6107
GE-6107	0,40	11,81	-85,29	31,13	9,50	12,21	8,18	GE-6107
M37=T41M_ENSIÖ	10,00	0,25	-78,56	0,57	0,19	0,23	4,38	GE-6109
GE-6109	0,40	9,41	-83,49	24,20	7,00	8,73	6,52	GE-6109
M37+10G	10,00	0,25	-78,52	0,57	0,19	0,23	4,38	GE-6109
M37+100H	0,40	9,28	-80,74	22,17	6,76	8,44	6,43	GE-6109
M37+20H	0,40	9,16	-79,81	21,44	6,68	8,32	6,35	GE-6109
M37+10H	0,40	8,95	-78,52	20,44	6,60	8,14	6,20	GE-6109
M89=T41M_ENSIÖ	10,00	0,25	-77,93	0,56	0,19	0,23	4,35	GE-6109
M37+1100H	0,40	7,77	-64,35	14,21	6,08	7,13	5,38	GE-6109
M46+100H	0,40	3,39	-43,60	5,13	3,13	3,40	2,35	GE-6109
M38+100H	0,40	2,91	-47,82	4,53	2,49	2,91	2,02	GE-6109
PALOKUNTA_PKV	0,40	6,22	-49,62	9,82	5,26	6,24	4,31	GE-6109
M78=T41M_ENSIÖ	10,00	0,25	-78,27	0,57	0,19	0,23	4,37	GE-6109
M84+100H	0,40	5,35	-60,60	9,28	4,53	5,37	3,71	GE-6109
M39+100H	0,40	6,21	-64,23	11,18	4,77	5,67	4,30	GE-6109
M83+100H	0,40	3,94	-39,85	5,87	3,61	3,94	2,73	GE-6109
HUOLTORAKENNUS_KESKUS_VPK	0,40	2,02	-16,89	2,91	1,99	2,02	1,40	GE-6109
M84+RH100	0,40	5,13	-58,38	8,68	4,39	5,14	3,55	GE-6109
M78+100G	10,00	0,25	-78,30	0,57	0,19	0,23	4,37	GE-6109
M89+100G	10,00	0,25	-77,97	0,56	0,19	0,23	4,35	GE-6109
M84+RH200	0,40	4,98	-55,90	8,24	4,30	5,00	3,45	GE-6109
M89+100H	0,40	3,14	-75,83	6,66	2,72	3,16	2,17	GE-6109
M78-100H	0,40	3,97	-73,57	8,13	2,99	3,62	2,75	GE-6109
M89+100RH	0,40	3,08	-74,17	6,36	2,68	3,10	2,13	GE-6109
M89+RH200	0,40	3,05	-72,45	6,13	2,67	3,07	2,11	GE-6109
M80=T41M_TOISIO	0,40	7,20	-64,83	13,10	6,55	7,23	4,99	GE-6113
M80=T41M_ENSIÖ	10,00	0,20	-68,16	0,38	0,19	0,20	3,49	GE-6113
GE-6113	0,40	13,98	-85,53	36,96	11,34	14,47	9,68	GE-6113
M80+100H	0,40	13,87	-85,29	36,46	11,22	14,32	9,61	GE-6113
M111+9300RH	0,40	11,52	-77,58	25,77	9,72	11,63	7,98	GE-6113
M130+100G	10,00	0,10	-81,60	0,24	0,10	0,10	1,77	GE-6114
M5+10	0,40	0,67	-29,70	0,97	0,66	0,67	0,46	GE-6114
M16	0,40	0,84	-35,16	1,22	0,83	0,84	0,58	GE-6114
M48	0,40	0,86	-36,87	1,26	0,85	0,86	0,60	GE-6114
M14+V	0,40	1,56	-70,30	3,00	1,52	1,56	1,08	GE-6114
VM14+JK01	0,40	1,62	-75,08	3,36	1,57	1,63	1,12	GE-6114
M088+100H_KISKO1	0,40	1,15	-63,12	2,01	1,13	1,15	0,80	GE-6114
M42+100H	0,40	1,01	-58,06	1,68	1,00	1,01	0,70	GE-6114
M14+100G	10,00	0,10	-81,43	0,24	0,10	0,10	1,77	GE-6114
M130=T41M_TOISIO	0,40	3,23	-85,18	8,21	3,12	3,30	2,24	GE-6114
M130+1100H	0,40	3,28	-86,17	8,53	3,17	3,37	2,27	GE-6114
M22+V	0,40	0,77	-61,14	1,32	0,64	0,78	0,54	GE-6114
M41+100H	0,40	0,61	-52,39	0,98	0,47	0,56	0,42	GE-6114

M31	0,40	0,51	-23,96	0,74	0,51	0,51	0,35	GE-6114
M22+100G	10,00	0,10	-81,32	0,24	0,10	0,10	1,76	GE-6114
GE-6114	0,40	3,36	-89,07	9,41	3,26	4,04	2,33	GE-6114
M15=T41M_ENSIÖ	10,00	0,10	-81,39	0,24	0,10	0,10	1,77	GE-6114
M088+9200RH	0,40	1,12	-62,10	1,93	1,10	1,12	0,77	GE-6114
M088+100H_KISKO2	0,40	1,13	-62,27	1,95	1,11	1,13	0,78	GE-6114
M14=T41M	10,00	0,10	-81,32	0,24	0,10	0,10	1,76	GE-6114
M77+100G	10,00	0,10	-80,00	0,23	0,10	0,10	1,76	GE-6114
M77+100H	0,40	1,30	-41,09	1,94	1,29	1,30	0,90	GE-6114
M31=VM13_ENSIÖ	10,00	0,10	-81,11	0,24	0,10	0,10	1,76	GE-6114
M98+100G	10,00	0,10	-81,37	0,24	0,10	0,10	1,76	GE-6114
M22=T41M_ENSIÖ	10,00	0,10	-81,22	0,24	0,10	0,10	1,76	GE-6114
M13+V	0,40	0,64	-60,25	1,09	0,64	0,65	0,45	GE-6114
M98+100H	0,40	2,05	-79,28	4,60	1,98	2,07	1,42	GE-6114
M15+100G	10,00	0,10	-81,41	0,24	0,10	0,10	1,77	GE-6114
M15+V	0,40	1,60	-75,30	3,33	1,56	1,61	1,11	GE-6114
M13+100G	10,00	0,10	-81,21	0,24	0,10	0,10	1,76	GE-6114
M18	0,40	0,43	-39,69	0,64	0,43	0,43	0,30	GE-6114
M98=T41M_TOISIO	0,40	2,08	-79,86	4,71	2,00	2,10	1,44	GE-6114
M43	0,40	0,67	-29,70	0,97	0,66	0,67	0,46	GE-6114